



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**PRINCIPY GENEROVÁNÍ RF SIGNÁLŮ - LABORATORNÍ
PŘÍPRAVEK**

GENERATION OF RF SIGNALS - EDUCATIONAL LABORATORY EXAMPLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Uhliar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Marek Uhliar

ID: 154900

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Principy generování RF signálů - laboratorní přípravek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte přípravek pro laboratorní výuku realizující několik zdrojů signálů (jednoduchý šumový generátor, koherentní a nekoherentní syntéza/ fázový závěs, zázněj/ směšování). Návrh směřujte do kmitočtů desítek MHz. Obvod fázového závěsu uzpůsobte pro generování signálů (využití výstupu VCO) i demodulaci frekvenčně modulovaného signálu (připravte výstupy dílčích bloků závěsu dostupné pro monitorování na osciloskopu). Návrh ověřte simulacemi v PSpice.

Zařízení zhotovte ve formě přípravku ukázkové laboratorní úlohy. Sestavte a připravte demonstrační ukázky (jednotlivé úkoly a zadání: měření ve spektrální oblasti, měření ladících charakteristik, měření časových odezev jednotlivých bloků fázového závěsu, sledování kombinačních produktů), podklady pro měření (návod k úloze) a vypracování (standardní formulář). Cvičení koncipujte tak, aby v rámci domácí přípravy student provedl teoretický úvahový/početní návrh (poskytněte nutné vztahy) a experimentálně ověřil reálné vlastnosti obvodů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] LÁNÍČEK, R. Elektronika: obvody, součástky, děje. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-8605-25-2.

[2] HANUS, S., SVAČINA, J. Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika: přednášky. Vyd. 2., dopl. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2222-X.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práca sa zaoberá návrhom, simuláciou a vyhotovením laboratórneho prípravku. Hlavný zámer práce je návrh a realizácia jednoduchého šumového generátora, zdrojov signálu, zmiešavača a slučky fázového závesu pre potreby výuky.

Kľúčové slová

Laboratórny prípravok, Šumový generátor, Zmiešavač, Slučka fázového závesu

Abstract

The work deals with design, simulation and preparation of laboratory preparation. The main aim of the thesis is to design and implement a simple noise generator, signal sources, mixer and phase lock loop for teaching purposes.

Keywords

Laboratory equipment, Noise generator, Mixer, Phase-locked loop

Bibliografická citácia:

UHLIAR, Marek. Principy generování RF signálů - laboratorní přípravek. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118462>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Roman Šotner.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému Principy generování RF signálů - laboratorní přípravek som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorská práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si úplne vedomí následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 12. Mája 2019

.....
podpis autora

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod..... | 11 |
| 1. Teória | 12 |
| 1.1 Šum | 12 |
| 1.2 Kryštálom riadený oscilátor | 13 |
| 1.3 Zmiešavanie signálov | 14 |
| 1.4 Slučka fázového závesu | 16 |
| 2. Návrh prípravku | 17 |
| 2.1 Šumový generátor | 17 |
| 2.2 RF zmiešavač | 23 |
| 2.3 Zdroje periodických signálov..... | 26 |
| 2.4 Slučka fázového závesu | 29 |
| 3. Realizácia zariadenia..... | 32 |
| 3.1 Šumový generátor | 33 |
| 3.2 RF zmiešavač | 35 |
| 3.3 Zdroje periodických signálov..... | 35 |
| 3.4 Slučka fázového závesu a VCO | 37 |
| 3.5 Mechanické prevedenie..... | 40 |
| 4. Vzorové vypracovanie protokolu | 41 |
| 4.1 Zadanie | 41 |
| 4.2 Popis prípravku | 42 |
| 4.3 Vypracovanie | 44 |
| 5. Záver | 52 |

Zoznam symbolov a skratiek

| | |
|------|---|
| DPS | Doska plošného spoja |
| ESD | Electrostatic discharge, elektrostatický výboj |
| FET | Field effect transistor, tranzistor riadený elektrickým polom |
| IF | Intermediate frequency, medzifrekvencia |
| LO | Local oscillator, lokálny oscilátor |
| MMIC | Monolithic microwave integrated circuit, mikrovlnný integrovaný obvod |
| PLL | Phase-locked loop, slučka fázového závesu |
| RF | Radio frequency, rádio frekvencia |
| SC | Spoločný kolektor |
| SE | Spoločný emitor |
| SMA | Subminiature connector version A, sub miniatúrny koaxiálny konektor |
| SMD | Surface mount devices, súčiastky pre povrchovú montáž |
| THT | Through-hole technology, komponenty osadzované skrz dosku |
| VCO | Voltage-controlled oscillator, napätím riadený oscilátor |

Zoznam obrázkov

| | |
|---|----|
| Obr. 1-1 Kryštálový oscilátor [3]..... | 13 |
| Obr. 1-2 Symbol zmiešavača [6] | 14 |
| Obr. 1-3 Zmiešavač na rozdielovú medzi frekvenciu [7] | 14 |
| Obr. 1-4 Zmiešavači na súčtovú medzi frekvenciu [7]..... | 15 |
| Obr. 1-5 Gilbertova bunka [8] | 15 |
| Obr. 1-6 Jednoduchá slučka fázového závesu | 16 |
| Obr. 1-7 Jednoduchá slučka fázového závesu s deličkou | 16 |
| Obr. 2-1 Schéma zapojenia šumového generátora..... | 18 |
| Obr. 2-2 Simulácia prenosovej charakteristiky kaskády zosilňovačov | 19 |
| Obr. 2-3 Osadená doska šumového generátora..... | 19 |
| Obr. 2-4 Schéma zapojenia BGA28xx..... | 20 |
| Obr. 2-5 Osadená doska s MMIC | 20 |
| Obr. 2-6 Spektrum šumu na výstupe šumového generátora s tranzistormi | 21 |
| Obr. 2-7 Spektrum šumu na výstupe šumového generátora s MMIC..... | 21 |
| Obr. 2-8 Blokový diagram SA602/SA612 [16] | 23 |
| Obr. 2-9 Schéma zapojenia RF zmiešavača..... | 23 |
| Obr. 2-10 Spektrum f_{RF} pri simulácii zmiešavania f_{LO} 33 MHz a f_{RF} 100 MHz ... | 24 |
| Obr. 2-11 Osadená experimentálna doska RF zmiešavača | 24 |
| Obr. 2-12 Spektrum zmiešavania f_{LO} 33 MHz a f_{RF} 100 MHz na prototypovej DPS | 25 |
| Obr. 2-13 Výstup 33 MHz kryštálového oscilátora - Rigol DS1052..... | 26 |
| Obr. 2-14 Spektrum výstupu 33 MHz oscilátora..... | 27 |
| Obr. 2-15 Schéma zapojenia oscilátora s priečkovým filtrom..... | 27 |
| Obr. 2-16 Simulácia prenosovej charakteristiky vypočítaných filtrov | 28 |
| Obr. 2-17 Bloková schéma 4046 [19]..... | 29 |
| Obr. 2-18 Simulácia max. frekvencie VCO..... | 29 |
| Obr. 2-19 Simulácia demodulácie frekvenčne modulovaného signálu | 30 |
| Obr. 2-20 Detail simulácie výstupného napätia komparátora a napätia na kondenzátore filtra | 31 |
| Obr. 3-1 Panely vyrobených DPS..... | 32 |

| | |
|---|----|
| Obr. 3-2 Chyba servisnej potlače..... | 32 |
| Obr. 3-3 Schéma šumového generátora s MMIO | 33 |
| Obr. 3-4 Osadená DPS šumového generátora | 34 |
| Obr. 3-5 Výstup šumového generátora | 34 |
| Obr. 3-6 Osadená doska RF zmiešavača..... | 35 |
| Obr. 3-7 Osadená doska zdrojov speriodických signálov..... | 35 |
| Obr. 3-8 Spektrum výstupného signálu z oscilátora 16 MHz..... | 36 |
| Obr. 3-9 Výstup oscilátora 16 MHz po odfiltrovaní vyšších harmonických | 36 |
| Obr. 3-10 Osadená doska modulu fázového závesu | 37 |
| Obr. 3-11 Náhrada DIP prepínača | 37 |
| Obr. 3-12 Výstup VCO pri $C = 47 \text{ pF}$ | 38 |
| Obr. 3-13 Príklad výstupného signálu z VCO | 38 |
| Obr. 3-14 Príklad vstupného signálu z generátora pred frekvenčnou moduláciou (modrá) a modulovaný signál (červená) | 39 |
| Obr. 3-15 Rozmiestnenie ovládacích prvkov na prednom paneli lab. prípravku | 40 |
| Obr. 4-1 Rozloženie predného panelu | 42 |
| Obr. 4-2 Spektrum na výstupe šumového generátora..... | 44 |
| Obr. 4-3 Spektrum f_{MF} pre $f_{\text{LO}}=16 \text{ MHz}$ $f_{\text{RF}}=25 \text{ MHz}$ | 44 |
| Obr. 4-4 Závislosť f_{VCO} na U_{VCO} pre $C = 47 \text{ pF}$ | 48 |
| Obr. 4-5 Závislosť f_{VCO} na U_{VCO} pre $C = 220 \text{ pF}$ | 48 |
| Obr. 4-6 Závislosť f_{VCO} na U_{VCO} pre $C = 820 \text{ pF}$ | 49 |
| Obr. 4-7 Závislosť f_{VCO} na U_{VCO} pre $C = 10 \text{ nF}$ | 49 |
| Obr. 4-8 Využitie VCO ako FM modulátora..... | 50 |
| Obr. 4-9 PLL ako FM demodulátor | 50 |

ÚVOD

Na trhu sa objavujú zariadenia, ktoré sú zamerané na praktickú stránku výuky fungovania zmiešavania signálov, funkcie fázového závesu a zachádzania so spektrálnym analyzátorom. Na týchto prípravkoch je možné zmiešavať viacero signálov, modulácia, demodulácia, generovanie potrebných signálov. Cieľom práce bolo navrhnuť demonštračný prípravok predvádzajúci obdobné operácie ale za zlomok ceny, keď že profesionálne prípravky sa pohybujú cenou okolo 10 000 kč. Návrh prípravku pre laboratórnu výuku má obsahovať niekoľko zdrojov signálov vrátane jednoduchého šumového generátora, zmiešavača a slučky fázového závesu. Obvod slučky fázového závesu má byť schopný generovať signály pomocou napätím riadeného oscilátora a umožňovať frekvenčnú demoduláciu. Následne k prípravku bude vytvorená laboratórna úloha.

1. TEÓRIA

1.1 Šum

Pod názvom šum si môžeme predstaviť náhodný signál ktorý svojou prítomnosťou obohacuje užitočný signál o nadbytočnú informáciu a komplikuje jeho následné spracovanie. Šumy sa delia do niekoľko kategórií a pod kategórií, na základe vzniku a farby šumu. Šumy môžeme v prvom rade rozdeliť na externé, kedy šum vzniká mimo obvod a interné, kde šum vzniká v obvode [1].

Interné šumy sa následne líšia na základe fyzikálnej podstaty svojho vzniku kde v elektronických obvodoch sa najčastejšie stretneme so šumom tepelným, výstrelovým a blikavým.[1]

Tepelný šum vzniká vo všetkých vodičoch a polovodičoch následkom pohybu voľných elektrónov ktoré sa náhodne pohybujú pri teplote vyššej než je 0 K. Tepelný šum má konštantnú spektrálnu výkonovú úroveň až do TeraHertzov (THz). Najjednoduchším prípadom je šum rezistora kde stredný kvadrát teplotného šumového napätia je daný vzťahom

$$\bar{U}_r^2 = 4kTRB_N, \quad (1.1)$$

kde:

k – Boltzmanova konštanta,
 T – absolútna teplota rezistora,
 R – odpor rezistora,
 B_N – šumová šírka pásma.

Výstrelový šum sa objavuje pri všetkých komponentoch využívajúcich PN prechod ako dôsledok vzniku nábojov a ich nespojitej rekombinácie na prechode PN [1].

$$\bar{I}_V^2 = 2qI_{DC}B_N, \quad (1.2)$$

kde:

q – náboj elektrónu $= 1.602 \cdot 10^{-19}$ [C],
 I_{DC} – jednosmerný prúd prechádzajúci PN prechodom,
 B_N – šumová šírka pásma.

Blikavý šum vzniká na základe nečistôt a porúch v kryštálovej mriežke polovodiča, kde sa prejavuje hlavne na nízkych frekvenciách. Spektrálna hustota výkonu klesá smerom k vyšším frekvenciám a to v závislosti $1/f$ [1].

Biely šum sa vyznačuje rovnomernou spektrálnou výkonovou úrovňou a teda má rovnaký výkon pri rôznych pásmach rovnakej šírky. Svoj názov dostal vďaka podobnosti s bielym svetlom. Medzi biely šum patrí teplotný šum a výstrelový šum. Farebné šumy sú šumy ktoré nezodpovedajú spektru bieleho šumu. Najznámejšie sú ružový, azúrový a hnedý šum [1].

1.2 Kryštálom riadený oscilátor

Pod pojmom oscilátor chápeme zariadenie ktoré generuje harmonický signál. Podľa princípu činnosti môžeme oscilátory rozdeliť do dvoch základných skupín a to oscilátory s záporným diferenciálnym odporom a spätno-väzobne oscilátory [2].

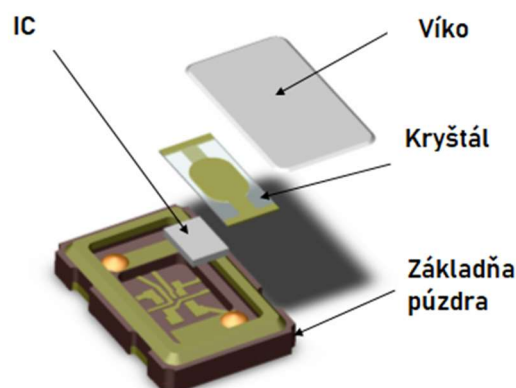
Následne je možné ešte rozdelenie do podskupín, na základe typu pasívnych akumulčných prvkov v obvode, ako sú: RC oscilátory, LC oscilátory, kryštálom riadené oscilátory. Vlastnosti oscilátora môžeme charakterizovať pomocou stability kmitočtu a presnosti kmitočtu. Stabilita kmitočtu je najväčšia relatívna zmena kmitočtu v určitom čase vzťahujúca sa k nominálnej hodnote ($\Delta f_0/f_0$). Zmena časovom intervale kratšom ako 1 s udáva tzv. o krátkodobú stabilitu. Presnosť kmitočtu sa opäť stanoví v určitom čase kde z nameraného časového priebehu sa určí stredná hodnota kmitočtu [1], [2].

Pre samotné generovanie je potreba zabezpečiť to aby vzniknuté kmity boli netlmené. Netlmené kmity zabezpečíme použitím aktívneho prvku, najčastejšie tranzistora ktorý predstavuje zosilňovač z ktorého výstupu je vyvedený signál na jeho vstup. Následne je potreba spĺňať fázovú a amplitúdovú podmienku [1].

$$\varphi_A + \varphi_B = 0, \quad (1.3)$$

$$|\bar{A}| \cdot |\bar{B}| = 1. \quad (1.4)$$

Kryštálom riadené oscilátory majú vysoký činiteľ akosti Q a teda dosahujú vysokej kmitočtovej stability. Zásluhou týchto vlastností sa najčastejšie používajú v nepreplacitných oscilátoroch, napríklad ako zdroj hodinového signálu pre mikrokontroler a vysoko frekvenčné aplikácie. Najčastejšie sa používajú tri zapojenia ktoré sa líšia zapojením tranzistora. Ak tranzistor pracuje v zapojení so spoločným emitorom jedná sa o Piercov oscilátor, ak tranzistor pracuje v zapojení so spoločnou bázou jedná sa o Clappov oscilátor. V prípade zapojenia so spoločným kolektorom je to Coplittsov oscilátor. Rezistory slúžia na nastavenie pracovného bodu tranzistora, kondenzátory spolu s kryštálom určujú frekvenciu oscilátora. Pri návrhu treba počítať s tým že tranzistor musí mať medznú frekvenciu minimálne desať krát vyššiu ako je požadovaná frekvencia generátora. Doladovanie kryštálom riadených oscilátorov je možné len v malom rozsahu a to pripojením vhodnej reaktancie [1], [2].

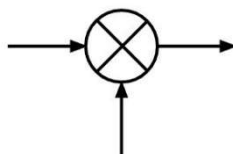


Obr. 1-1 Kryštálový oscilátor [3]

Integrovaním jedného z týchto obvodov do jedného puzdra (Obr. 1-1) vzniká samostatný komponent, kryštálový oscilátor. Kryštálové oscilátory sa vyrábajú v prevedení THT a SMD a to s teplotnou kompenzáciou a bez, s presnosťou stoviek až jednotiek ppm [4].

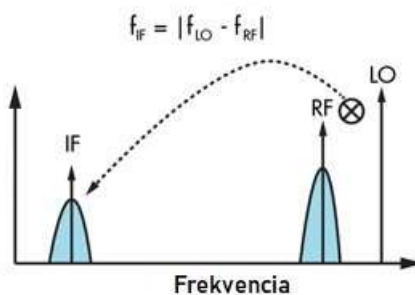
1.3 Zmiešavanie signálov

Zmiešavač je založený na nelineárnom prvku alebo na prvku ktorý umožňuje analógové násobenie signálov. Na Obr. 1-2 je znázornený ideálny prípad, kedy je výstup zmiešavača spektrálne obmedzený. V reálnom prípade na výstupe zmiešavača vznikajú násobky a rozdiely násobkov základných tónov [1], [5].

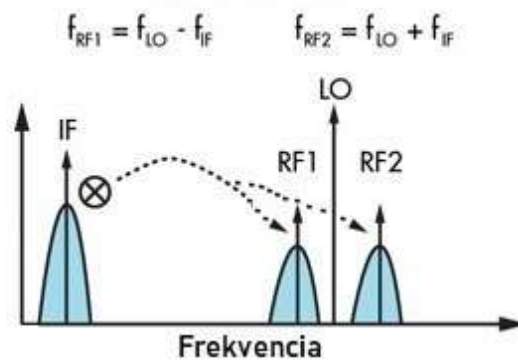


Obr. 1-2 Symbol zmiešavača [6]

Zmiešavače môžeme rozdeliť do dvoch základných skupín: aditívne a multiplikatívne. Aditívne zmiešavače využívajú jeden tranzistor alebo diódu na rozdiel od multiplikatívneho zmiešavača ktorý využíva analógové násobenie signálu, ktoré prebieha v integrovanom obvode alebo dvojhradlovom unipolárnom tranzistore (FET). Na výstupe vznikajú produkty zmiešavania z ktorých sa vhodným filtrom vyberie potrebný produkt. Zapojenie kde využívame len rozdielový medzifrekvenčný kmitočet sa nazýva zmiešavač na rozdielovú medzi frekvenciu (Obr. 1-3). V prípade zapojenia kde sa využíva súčtový kmitočet hovoríme o zmiešavači na súčtovú medzi frekvenciu (Obr. 1-4) [1],[5].

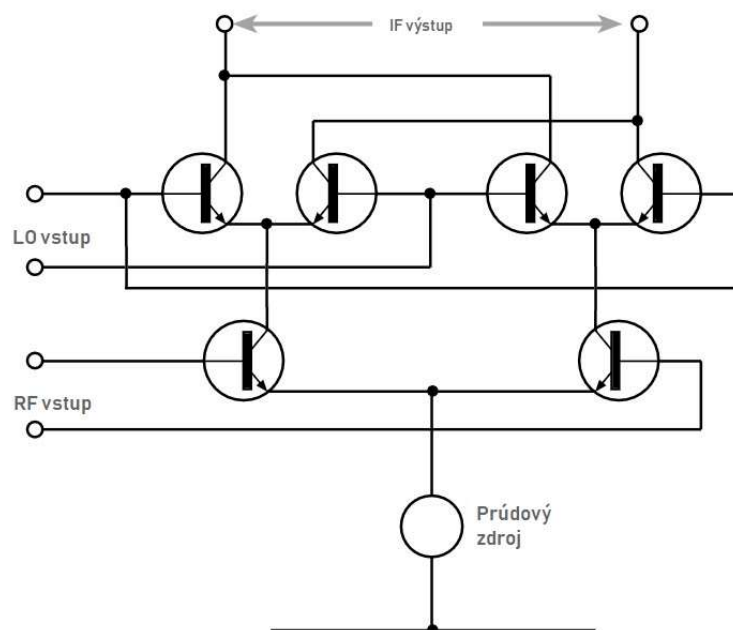


Obr. 1-3 Zmiešavač na rozdielovú medzi frekvenciu [7]



Obr. 1-4 Zmiešavači na súčtovú medzi frekvenciu [7]

Jednou z najrozšírenejších foriem zmiešavača je dvojite vyvážený diódový zmiešavač a Gilbertova bunka (Obr. 1-5), a to pre potlačenie intermodulačných produktov ktoré sú viazané na párne násobky vstupných frekvencií ktoré by bolo ináč potreba potlačiť pomocou filtrov [1], [8].

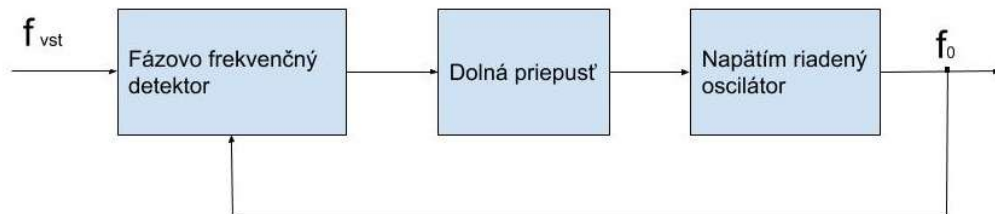


Obr. 1-5 Gilbertova bunka [8]

Gilbertova bunka sa najviac podobá svojim výstupným spektrom ideálnemu zmiešavaču. Výstupný signál je symetrický a na vstupy môže byť privedený nesymetrický signál voči zemi. Na rozdiel od dvojite vyváženého diódového zmiešavača nepotrebuje bifilárne vinuté transformátory čo zjednodušuje aplikáciu. Najčastejšie sa s ňou môžeme stretnúť ako súčasť štruktúry komplikovanejších špecializovaných integrovaných obvodov alebo ako samostatný integrovaný obvod [1], [5],[8].

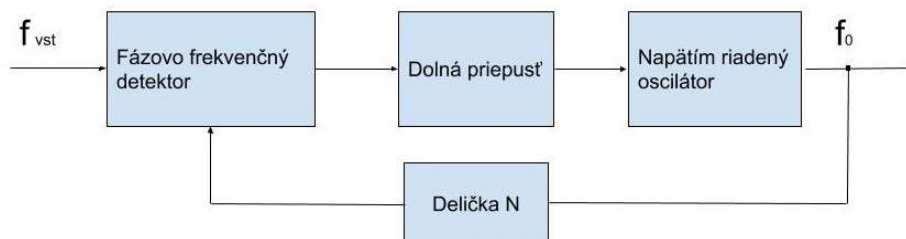
1.4 Slučka fázového závesu

Slučka fázového závesu (Phase Locked Loop) je regulačná slučka s automatickým riadením ktorá obsahuje fázový alebo frekvenčný detektor, filter typu dolná prepust' ktorý určuje rad slučky fázového závesu a napätím riadený oscilátor.



Obr. 1-6 Jednoduchá slučka fázového závesu

Detektor fázy je najčastejšie riešený pomocou logických obvodov umožňujúcich operáciu exkluzívneho súčtu. Detektor spracováva dva signály f_{vst} a f_0 ktoré majú rovnakú frekvenciu a porovnáva ich vzájomné fázové posunutie s uhlom 2π , za predpokladu že fázový rozdiel sa mení v čase len tak málo až ho môžeme považovať za konštantný. Dolná prepust' má ako jednu z úloh zadržať všetky striedavé zložky a ponechať len pomaly sa meniaci, prípadne jednosmerný signál ktorý bude použitý na preladenie oscilátora. Návrh filtra pri vysokofrekvenčných PLL býva komplikovaný a preto sú vyvinuté softwarové nástroje pre detailní návrh a analýzu [9]. Generovaný signál je zavedený spätnou väzbou na vstup detektora. V prípade že slučku spätnej väzby doplníme o delič kmitočtu s deliacim pomerom $1/N$, slučka začne pracovať ako násobič vstupného kmitočtu f_{vst} s násobkom N . Limitom pre maximálnu výstupnú frekvenciu je maximálna frekvencia VCO a maximálna frekvencia vstupného signálu pre deličku [1], [5], [10].



Obr. 1-7 Jednoduchá slučka fázového závesu s deličkou

2. NÁVRH PRÍPRAVKU

Návrh laboratórneho prípravku je koncipovaný do samostatných modulov ktoré sa spájajú pomocou koaxiálnych káblov s SMA konektorom. Tieto moduly budú následne zabudované do jednej krabičky tak aby študentom boli prístupné len vstupné/výstupné konektory a testovacie body pre osciloskop.

Laboratórny prípravok sa bude skladať z:

- Šumového generátora,
- Lokálnych oscilátorov - 10;16;25;32;50;100 MHz,
- RF zmiešavača,
- Slučky fázového závesu.

2.1 Šumový generátor

Koncept návrhu šumového generátora vychádza z teoretickej časti kde PN prechod bude zdrojom interného, výstrelového, šumu a každý komponent je sám zdrojom tepelného šumu [5]. Tieto šумы sa následne niekoľko násobne zosilnia spolu so šumovým faktorom zosilňovačov do požadovanej intenzity tak aby výstup sa mohol pripojiť na vstup nasledujúcich modulov. Na základe Friisovho vzťahu **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** si môžeme všimnúť že výsledné šumové číslo obvodu závisí na počte kaskádne radených obvodov. Vzniknutý šum by mal vlastnosti bieleho šumu. Ako zdroj šumu bola zvolená zenerová dióda ktorá je polarizovaná v závernom smere tak aby ňou prechádzali desiatky miliampérov čím sa docieli lavínový efekt. Lavínový efekt sa začína objavovať pri napätí nad cca. 6 V a je sprevádzaný výstrelovým šumom ktorý môžeme označiť zo spektrálneho pohľadu za šum biely [1],[5].

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} \dots \quad (2.1)$$

Následne je odfiltrovaná jednosmerná zložka pomocou keramického kondenzátora a signál šumu je privedený na vstup zosilňovača. Šumový generátor pozostával zo zdroja šumu a kombinácie 4 tranzistorových zosilňovačov (Obr. 2-1) ktoré boli v zapojení SE - SC - SE - SC s kapacitnou väzbou. Kombináciou zapojení bolo docielené že zosilnený šum je možné pripojiť k nízkej impedancii bez veľkej zmeny šírky pásma. Samotné tranzistory boli vyberané s ohľadom na možnosť simulácie v programe OrCad Capture, cene a tranzitnej frekvencie f_T , čím bol vybraný širokopásmový NPN tranzistor BFG425 [11] kde sa jednotková cena pohybuje okolo 2,5 Kč/kus. Návrh je možno previesť podľa nasledujúc rovníc [12]:

$$R_c + R_e = \frac{V_{cc} - U_{CE}}{I_C \left(\frac{h_{FE} + 1}{h_{FE}} \right)} = \frac{3 - 1,6}{2 \cdot 10^{-3} \left(\frac{80 + 1}{80} \right)} = 691,35 \, \Omega, \quad (2.2)$$

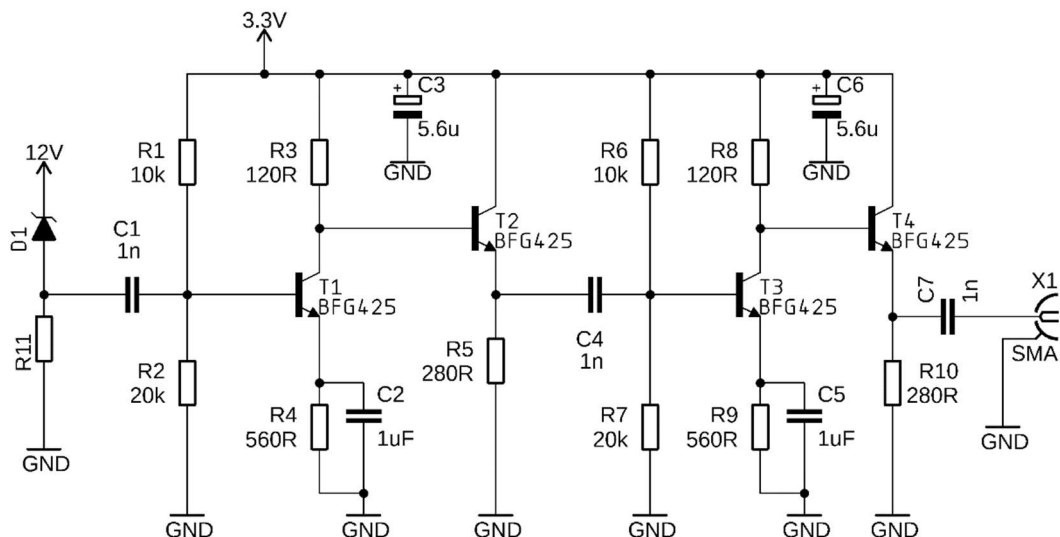
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{cc} - (U_{Re} + U_{BE})}{(U_{Re} + U_{BE})} = \frac{3 - (1,142 + 0,8)}{1,142 + 0,8} = \frac{529}{971}, \quad (2.3)$$

Veľkosť R_3 bola zvolená na $120 \, \Omega$ čím veľkosť R_4 musí mať hodnotu $572 \, \Omega$ a veľkosť R_2 zvolíme $20 \, k\Omega$, tak:

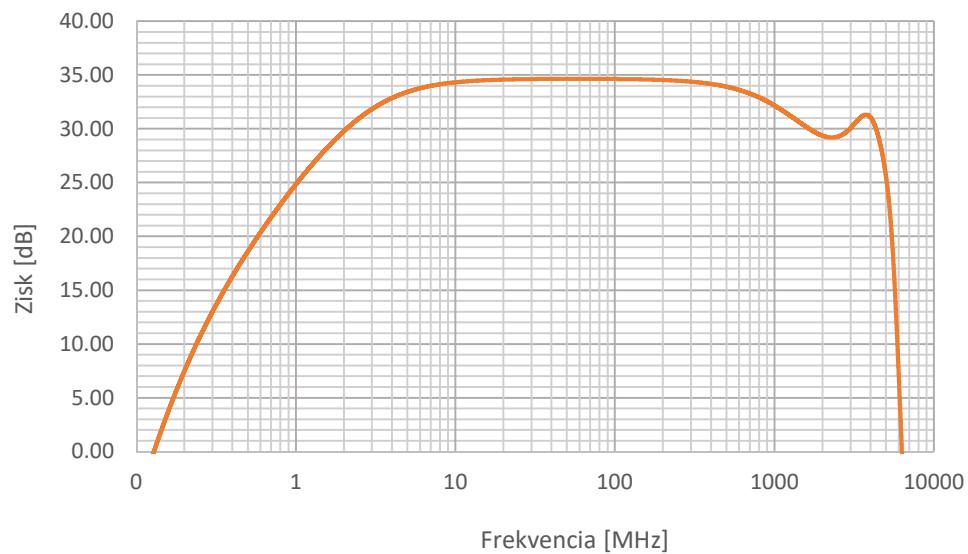
$$R_1 = 20000 \times \frac{529}{971} = 10,9 \, k\Omega. \quad (2.4)$$

Veľkosť oddeľovacích kondenzátorov bola zvolená na $1 \, nF$. Na základe výpočtov bol návrh zapojenia (Obr. 2-1) odsimulovaný v programe OrCad 16.6 a hodnoty kondenzátorov a rezistorov boli zaokrúhlené na hodnoty ktoré odpovedajú najbližšej dostupnej rade hodnôt. Na Obr. 2-2 je znázornená simulácia prenosu, navrhutej kaskády bez zenerovej diódy.

Pri zisťovaní frekvenčnej charakteristiky (AC odozvy) bol v experimentoch použitý budiaci zdroj so zvolenou amplitúdou $10 \, mV$, keď že nameraná úroveň šumu na použitej $6,8 \, V$ zenerovej dióde SZMMSZ6V8T1G [13] bola okolo 10 až $15 \, mV$ v závislosti na veľkosti prúdu ktorý diódou pretekal. Veľkosť prúdu bola volená tak aby stratový výkon neprekročil maximálny stratový výkon použitej diódy a zároveň sa docielilo najvyššej úrovne šumu.

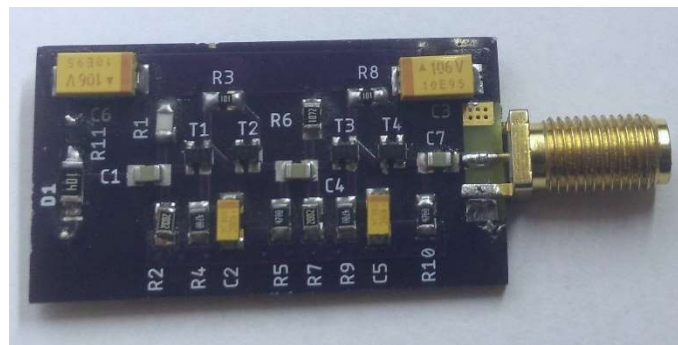


Obr. 2-1 Schéma zapojenia šumového generátora



Obr. 2-2 Simulácia prenosovej charakteristiky kaskády zosilňovačov

Schéma bola následne prekreslená do programu Autodesk Eagle a nasledoval návrh prototypovej DPS. Návrh plošného spoja (fotografia osadeného výsledku na Obr. 2-3) je koncipovaný na komponentoch pre povrchovú montáž, ktoré vytlačujú THT komponenty z trhu. Týmto krokom sú redukované parazitné kapacity / indukčnosti vývodov a minimalizovaná cena plošného spoja ktorá sa odvíja od plochy, počtu vrstiev a materiálu.

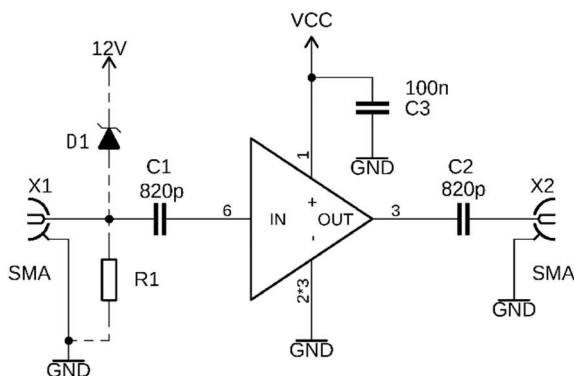


Obr. 2-3 Osadená doska šumového generátora

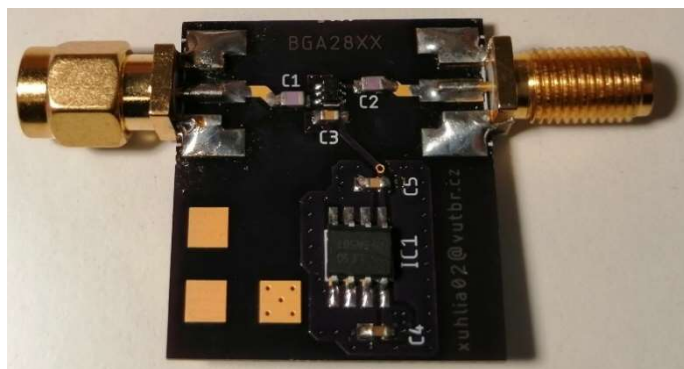
Pri prvom meraní navrhnutého obvodu bolo pozorované že obvod sa správa ako oscilátor na 40 MHz čomu bol pripisovaný pravdepodobne zlý návrh DPS dôsledkom čoho bol navrhnutý druhý zjednodušený generátor s využitím MMIC BGA28xx [14], [15]. Neskôr sa ukázalo že nefunkčnosť prvého návrhu bolo spôsobené nedodržaním ESD zásad pri osadzovaní DPS a po výmene tranzistorov obvod funguje.

Integrované mikrovlnné širokopásmové zosilňovače rodiny BGA28xx [14], [15] sa vyznačujú interne prispôbeným vstupom a výstupom k impedanciám 50 Ω , zosilnením 16-32 dB, malým 6 vývodovým puzdrom SOT363 a veľmi nízkou cenou okolo 3 Kč/kus. Pre obvody rodiny BGA28xx sa mi nepodarilo zohnať PSpice knižnice čím nemohli byť

realizované počítačové simulácie. Navrhnuté zapojenie zosilňovača (Obr. 2-4) je doporučené zapojenie z katalógového listu. Návrh dosky bol koncipovaný tak aby miesto zenerovej diódy mohol byť osadený SMA konektor. Takéto riešenie umožňuje reťazenie viacerých dosiek zosilňovača za sebou (Obr. 2-6) a tým určiť počet potrebných zosilňovačov.

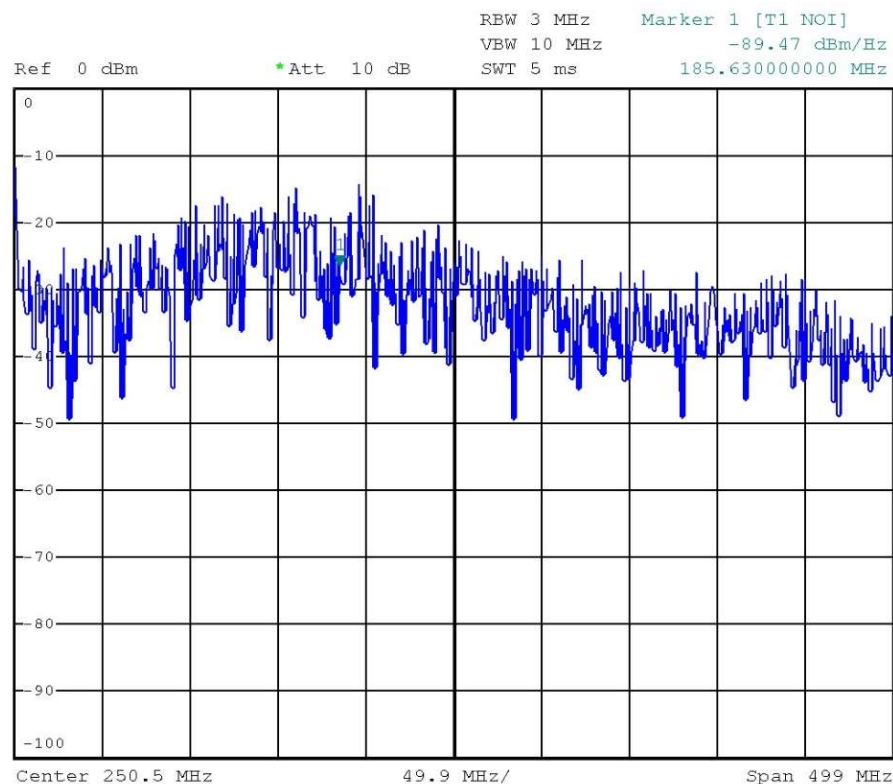


Obr. 2-4 Schéma zapojenia BGA28xx

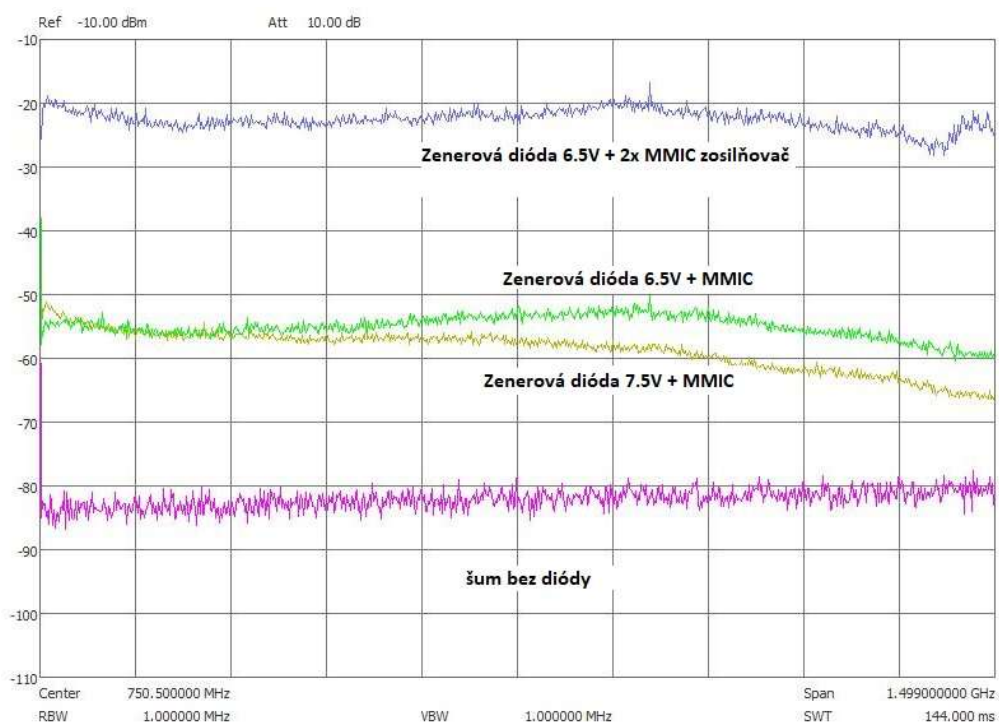


Obr. 2-5 Osadená doska s MMIC

Trojica odmaskovaných štvorcov v návrhu experimentálnej DPS (Obr. 2-6) slúži pre pripojenie napájacieho napätia pre lineárny stabilizátor IC_1 a ako pomocné body pre experimentovanie s výberom vhodného typu zenerovej diódy, prípadne tranzistora, slúžiaci ako hlavný zdroj šumu v kaskáde.



Obr. 2-6 Spektrum šumu na výstupe šumového generátora s tranzistormi



Obr. 2-7 Spektrum šumu na výstupe šumového generátora s MMIC

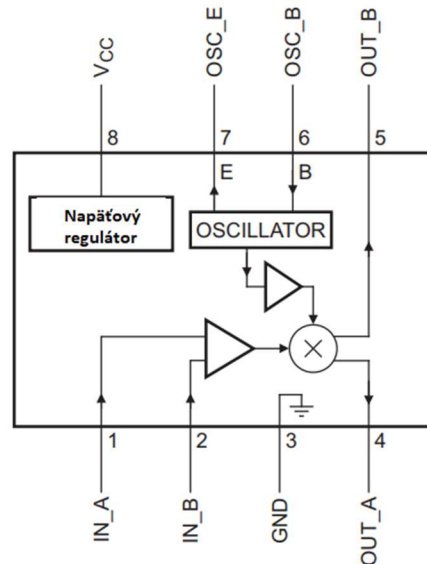
Na Obr. 2-6 je znázornené spektrum výstupného signálu diskretného riešenia šumového generátora, kde môžeme pozorovať „zvlnenie“ spektra vďaka čomu môže - me hovoriť o šume bielom iba v malom úseku zobrazeného spektra. V prípade druhého šumového

generátora (Obr. 2-7) sme docielili o mnoho rovnomernejšej výkonovej spektrálnej hustoty, čím sa druhý návrh viacej hodí ako zdroj bieleho šumu.

Výber vhodnej zenerovej diódy a veľkosť prúdu ňou prechádzajúceho prebiehal na experimentálnej doske s MMIC. Výber prebiehal čisto empirickým postupom kde jedno z mnohých meraní je znázornené na Obr. 2-7. Rovnako sa preukázalo že pevný odpor R_1 v návrhu Obr. 2-4 bude potreba nahradiť trimrom, čím sa bude dať nastaviť najvhodnejšia veľkosť prúdu pretekajúceho diódou.

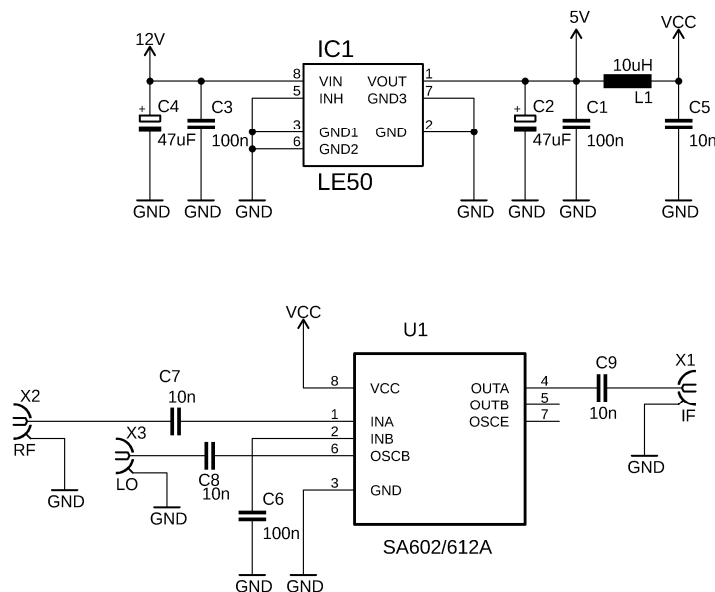
2.2 RF zmiešavač

Návrh modulu RF zmiešavača je založený na integrovanom obvode SA602/SA612 (Obr. 2-9). Jedná sa monolitický dvojte vyvážený zmiešavač s integrovaním oscilátorom a napäťovým regulátorom. Zmiešavač je schopný spracovávať signály až do 500 MHz a lokálny oscilátor do 200 MHz. Obvod SA612 je priamym nasledovníkom obvodu SA602 a NE602 [10].

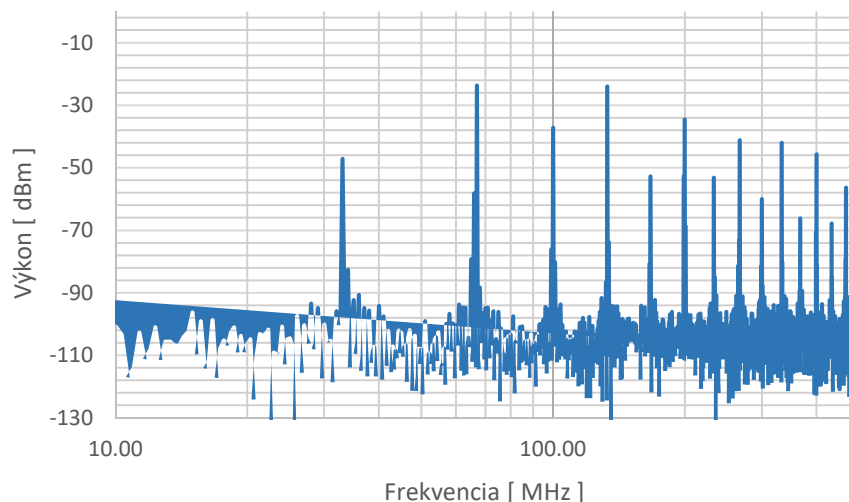


Obr. 2-8 Blokový diagram SA602/SA612 [16]

Schéma zapojenia (Obr. 2-10) vychádza z katalógového listu výrobcu. Ako stabilizátor bol použitý rovnako ako v prípade zapojenia šumového generátora s MMIC obvod LE50 ktorý ma na výstupe 5 V.



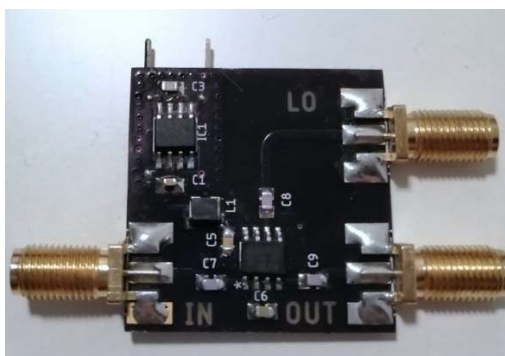
Obr. 2-9 Schéma zapojenia RF zmiešavača



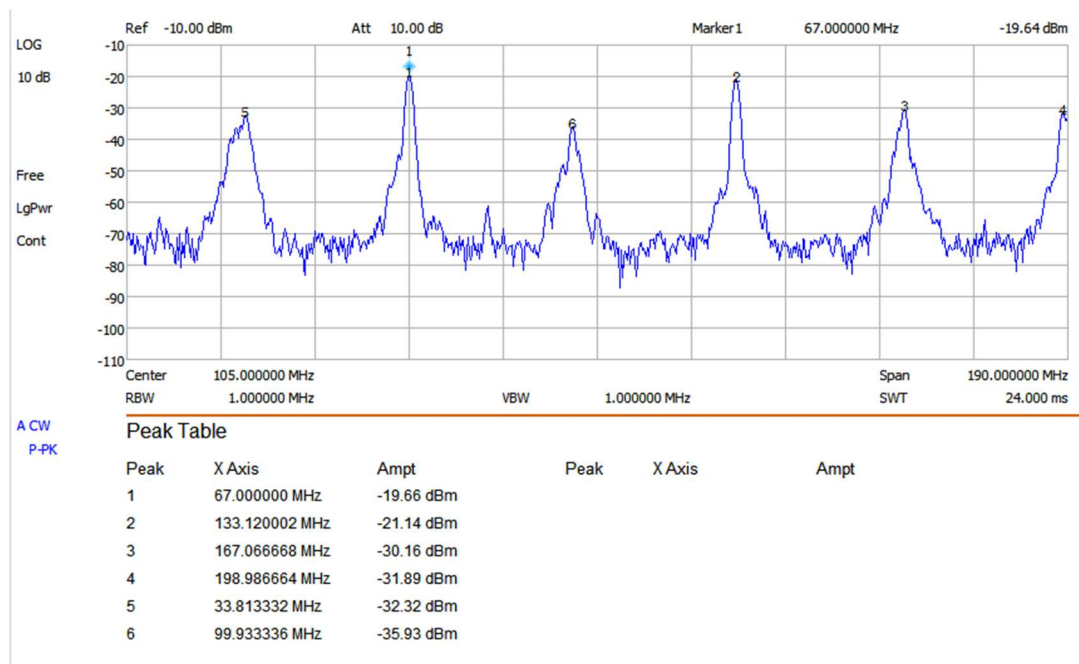
Obr. 2-10 Spektrum f_{RF} pri simulácii zmiešavania f_{LO} 33 MHz a f_{RF} 100 MHz

Pomocou simulácie sme si overili funkčnosť návrhu zmiešavania signálov (Obr. 2-10) a navrhnutú schému (Obr. 2-12) sme prekreslili do programu Eagle. Následne som nakreslil prototypovú DPS (Obr. 2-13), kde doska je rozdelená do dvoch častí: zdroj a mixér, oddelených filtračnou cievkou L_1 .

Obr. 2-12 znázorňuje namerané spektrálne hodnoty na výstupe osadenej prototypovej DPS ktoré odpovedajú predchádzajúcej simulácii (Obr. 2-10). V oboch prípadoch môžeme pozorovať potlačenie signálov f_{LO} , f_{RF} a ich nepárnych násobkov.



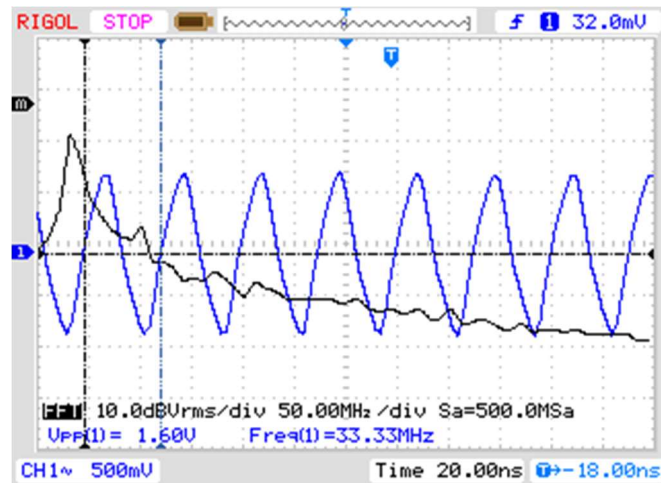
Obr. 2-11 Osadená experimentálna doska RF zmiešavača



Obr. 2-12 Spektrum zmiešavania f_{LO} 33 MHz a f_{RF} 100 MHz na prototypovej DPS

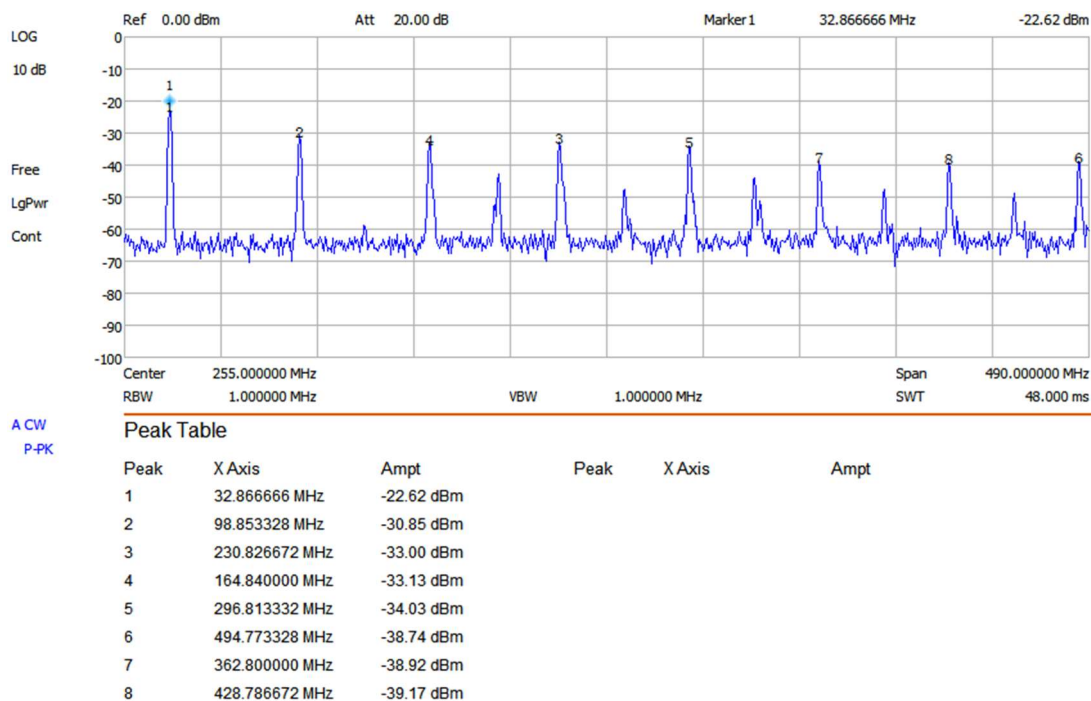
2.3 Zdroje periodických signálov

Ako zdroj signálov 10, 16, 24, 33, 50, 100 MHz boli zvolené integrované kryštálové oscilátory [17], ktoré sú v SMD prevedení veľkosti 7 x 5 mm. Využitím kryštálových oscilátorov sme docielili značné zjednodušenie obvodu spolu s úsporou času potrebného na návrh.

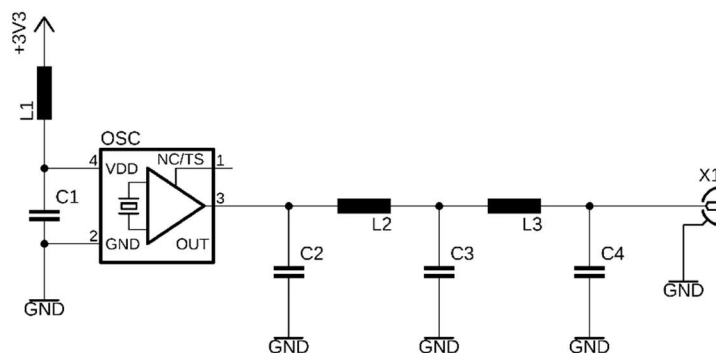


Obr. 2-13 Výstup 33 MHz kryštálového oscilátora - Rigol DS1052

Ako môžeme pozorovať na časových priebehoch z osciloskopu (Obr. 2-13) priebeh sa zobrazoval ako nekvalitný sínus. Toto zobrazenie je spôsobené nízkou vzorkovacou rýchlosťou použitého osciloskopu RIGOL DS1052, kde je splnený vzorkovací teorém iba pre prvú a tretiu harmonickú. Na základe spektrálnej analýzy výstupného signálu (Obr. 2-14) môžeme vypožorovať z vyšších harmonických, že výstup kryštálového oscilátora má spíš tvar obdĺžnika. Tieto zložky budeme potrebovať potlačiť, tak aby sme na výstupe zmiešavača dostali prevažne požadované produkty, na čo bol vybraný filter dolnej priepuste ktorý odfiltruje vyššie harmonické. Ako filtre dolnej priepuste boli zvolené π články LC (Obr. 2-18) ktoré sa nachádzajú na každej doske modulu oscilátora. Doska je navrhnutá ako univerzálna, tak že jeden návrh laminátu bude použitý pre všetky frekvencie.

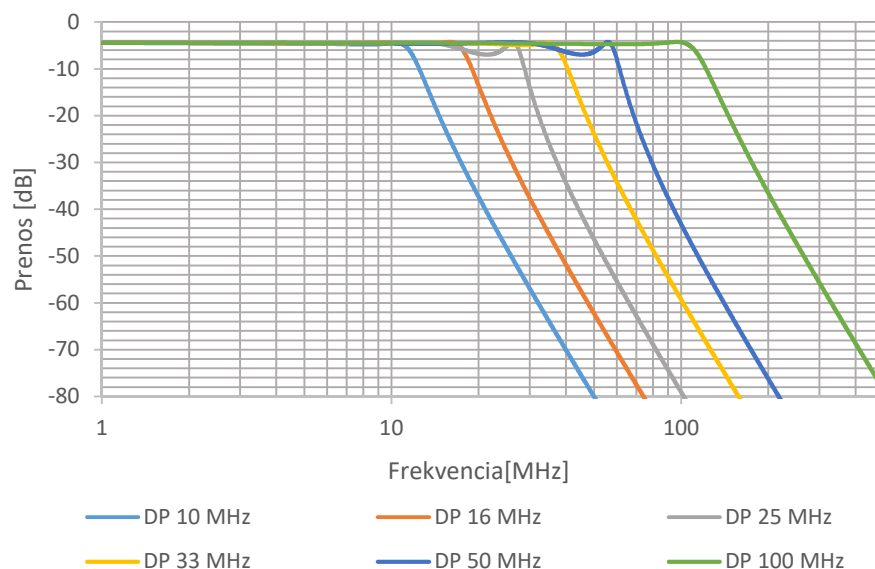


Obr. 2-14 Spektrum výstupu 33 MHz oscilátora



Obr. 2-15 Schéma zapojenia oscilátora s priečkovým filtrom

Pri návrhu filtra bolo uvažované že výstupná impedancia oscilátora sa pohybuje okolo 1 k Ω , keď že tento údaj sa v katalógovom liste nenachádza [17], [4]. Vstupná impedancia zmiešavača SA602/SA612 na základe katalógového listu bola stanovená na 1,5 k Ω [16]. Výpočet hodnôt komponentov bol realizovaný pomocou online kalkulatéra RF-Tools [18]. Kde vypočítané hodnoty všetkých filtrov som následne overil pomocou simulácií (Obr. 2-16).

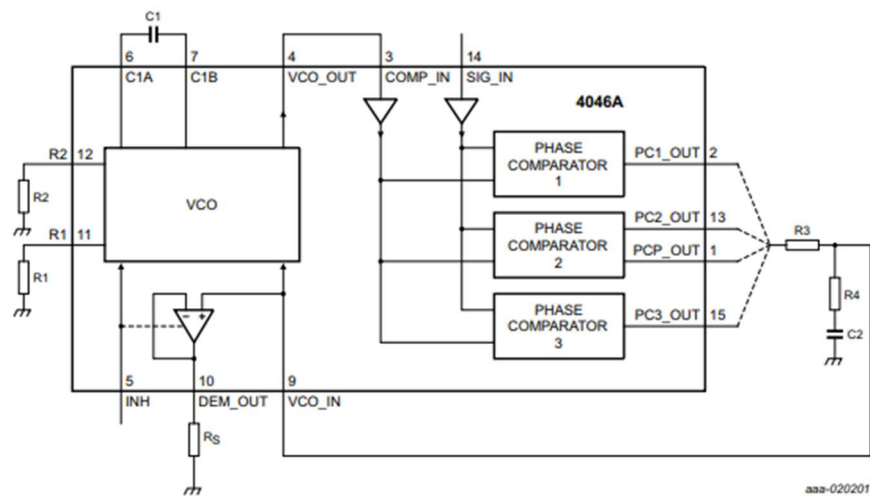


Obr. 2-16 Simulácia prenosovej charakteristiky vypočítaných filtrov

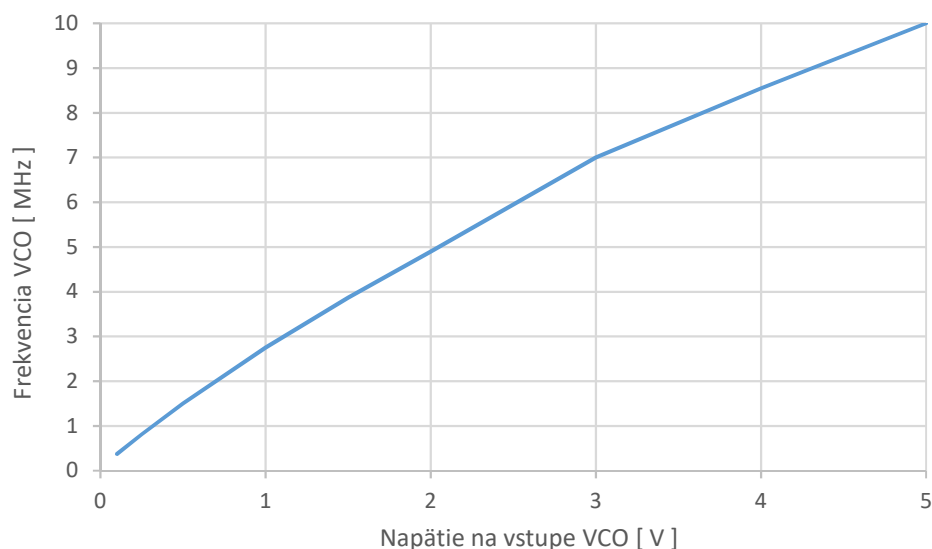
Pri simulácii parametrov filtrov boli využité parametrické rozmetania kde boli overené hraničné limity tolerance dostupných indukcií $\pm 20\%$. Uvádzané útlmy v priepustnom pásme 5 až 7 dB (Obr. 2-16) predstavujú značné plus, vzhľadom k tomu že obvod SA602/SA612 (Obr. 2-8) obsahuje vstupné zosilňovače a výstupné napätie kryštálového oscilátora by znamenalo ich prebudenie. Na základe simulácií sme si overili, že v uvedenom návrhu môžeme indukčnosti a kapacity značne zaokrúhľovať podľa dostupnosti komponentov na trhu. Výsledná úroveň signálu bude v prípade potreby následne ešte upravená pridaním SMD predradného rezistoru ku SMA konektoru navrhovaného generátora.

2.4 Slučka fázového závesu

Pre slučku fázového závesu bol zvolený obvod 74HC4046 [19] pre ktorého ekvivalent CD4046 (Obr. 2-17) existujú knižnice modelov v PSpice, kde jediný rozdiel je v maximálnej frekvencii VCO pri max. napätí na VCO (Obr. 2-18) a použitých komparátorov. Odvod obsahuje všetky potrebné časti pre zostrojenie fázového závesu spolu s dvoma komparátormi. Pomocou kondenzátora C_1 a rezistora R_1 sa určuje maximálna frekvencia VCO, ktorá môže byť v prípade 74HC4046 až 38 MHz [19]. Rezistor R_2 určuje posun minimálnej frekvencie. Integrovaná zenerová dióda 5.2 V slúži pre stabilizovanie napájacieho napätia integrovaného obvodu. Pre potreby laboratórneho prípravku sa budú využívať dva moduly s obvodom PLL kde prvý bude slúžiť ako modulátor a napätím riadený generátor. Druhý modul bude slúžiť ako demodulátor.



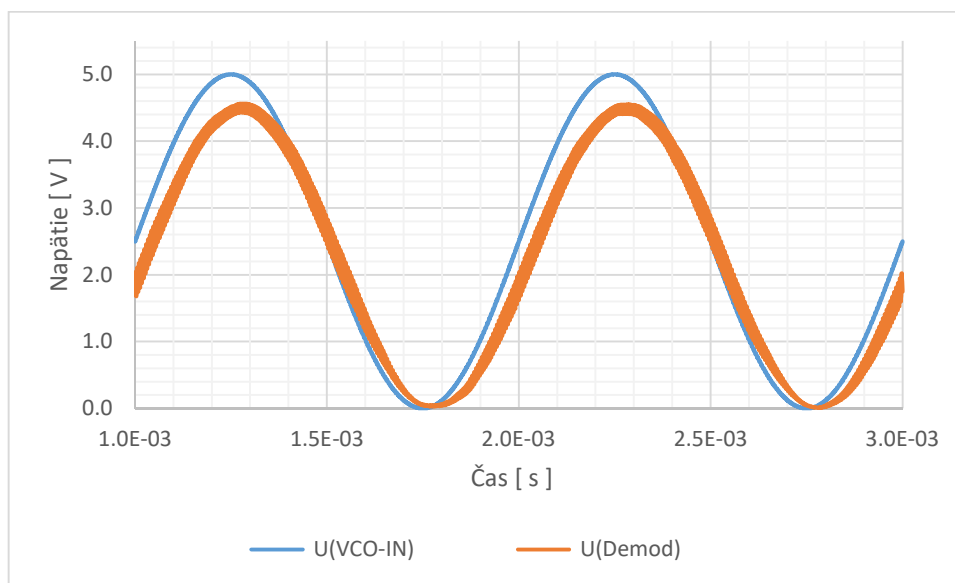
Obr. 2-17 Bloková schéma 4046 [19]



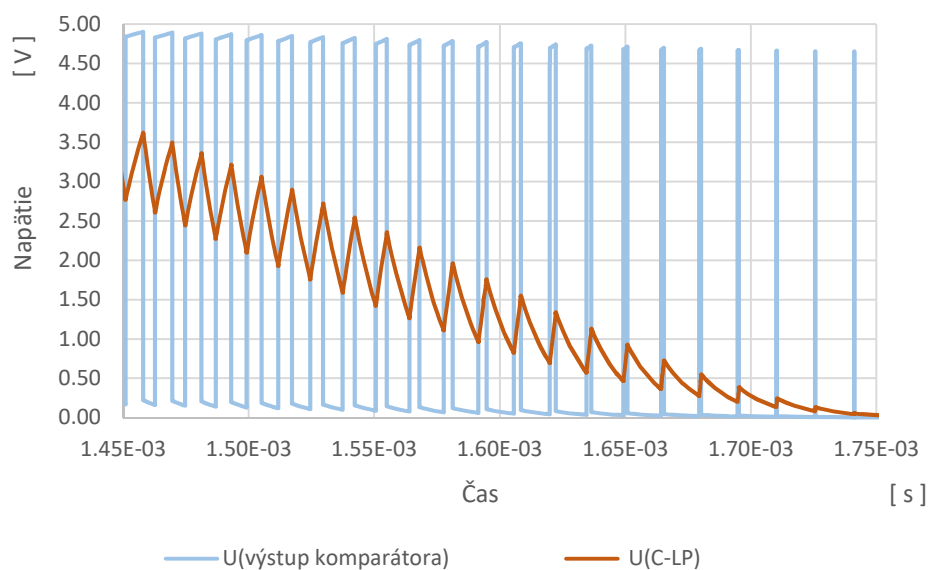
Obr. 2-18 Simulácia max. frekvencie VCO

V prípade prvého modulu rezistor R_1 bude nahradený viac otáčkovým potenciometrom a kondenzátor C_1 bude tvoriť pole kondenzátorov a prepínač typu DIP. Rezistor R_2 bude tvorený rovnakým polom rezistorov tak aby bolo možné plynulo meniť rozsah odstupe spodnej frekvencie. Vstup VCO bude možné prepínať medzi vstupom signálu ktorý má byť frekvenčne modulovaný a napäťovým deličom tvoreným druhým viac otáčkovým potenciometrom

Modul demodulátora obsahuje rovnaké riešenie nožnej selekcie rezistorov R_1 R_2 a C_1 , s tým rozdielom že vstup VCO je priamo pripojený na výstup prvého komparátora. Obvod je doplnený o detekciu zavesenia. Filter spätnej väzby na VCO bude jednoduchý RC článok kde C sa bude voliť pomocou DIP prepínača a R lineárnym potenciometrom.



Obr. 2-19 Simulácia demodulácie frekvenčne modulovaného signálu

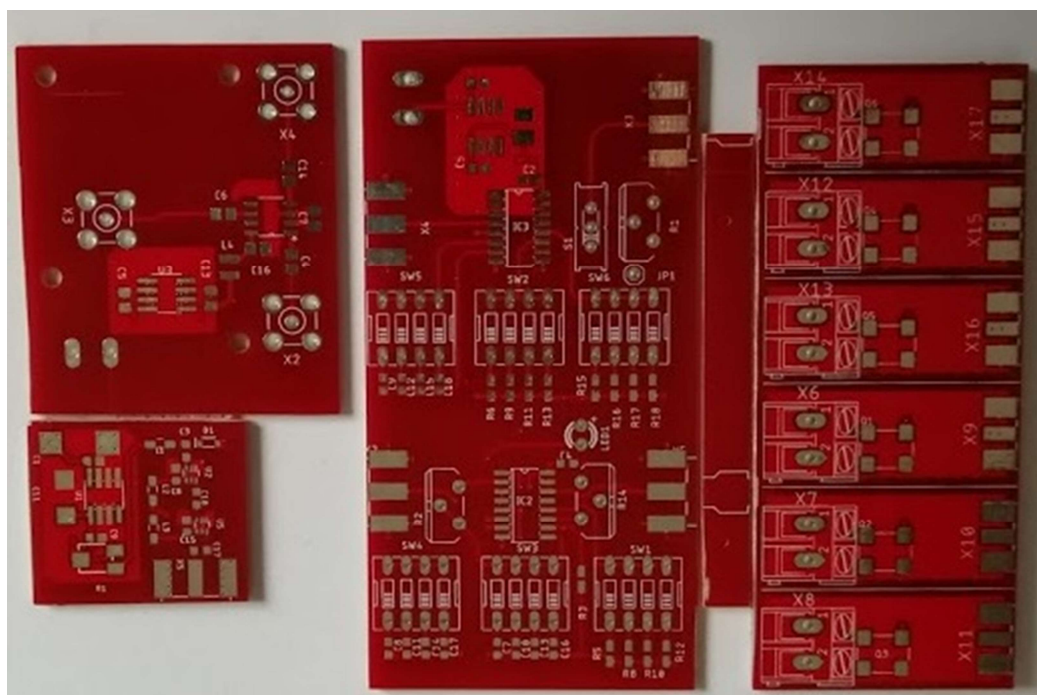


Obr. 2-20 Detail simulácie výstupného napätia komparátora a napätia na kondenzátore filtra

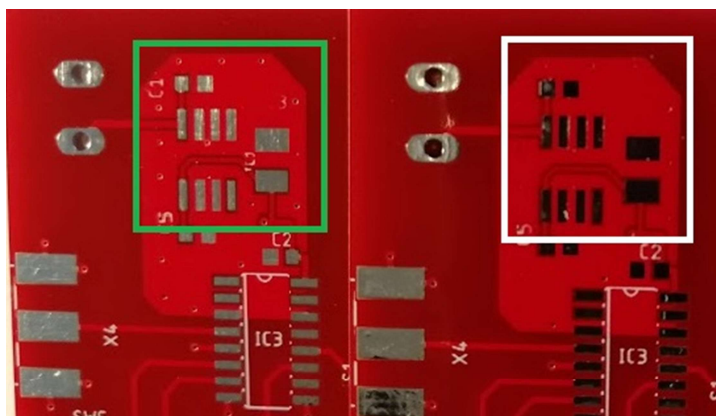
Na Obr. 2-19 je znázornená simulácia využitia prvého modulu na moduláciu sínusového signálu $f = 1$ kHz ktorý je privedený na vstup U_{VCO-IN} . Frekvenčne modulovaný signál z prvého modulu je privedený na vstup druhého modulu kde je signál následne demodulovaný U_{Demod} . Obr. 2-20 predstavuje detail výstupného napätia komparátora pred filtrom spätnej väzby vstupujúcej do VCO. U_{C-LP} je napätie na kondenzátore dolnej priepuste a zároveň aj samotný výstupný demodulovaný signál.

3. REALIZÁCIA ZARIADENIA

Laboratórny prípravok je realizovaný na viacerých doskách plošných spojov ktoré predstavujú samostatné bloky. Tento koncept bol zvolený s ohľadom na cenu DPS spolu s možnosťou jednoduchšej výmeny poškodeného modulu v prípade poruchy. Dosky plošných spojov sú umiestnené na dva samostatné panely a vyrobené u profesionálneho výrobcu SeedStudio. Takýmto riešením sme získali profesionálne DPS so servisnou potlačou umiestnenia komponentov, nepájivou maskou a konečnou úpravou spájkovacích plôch pocínovaním (HASL). Cena takto vyrobených DPS spolu predstavovala 230 Kč pre 2 x 10 panelov. Jedinou podmienkou výrobcu v tomto prípade je splnenie max. rozmerov návrhu 100 x 100mm a vlastná depanelizácia.



Obr. 3-1 Panely vyrobených DPS

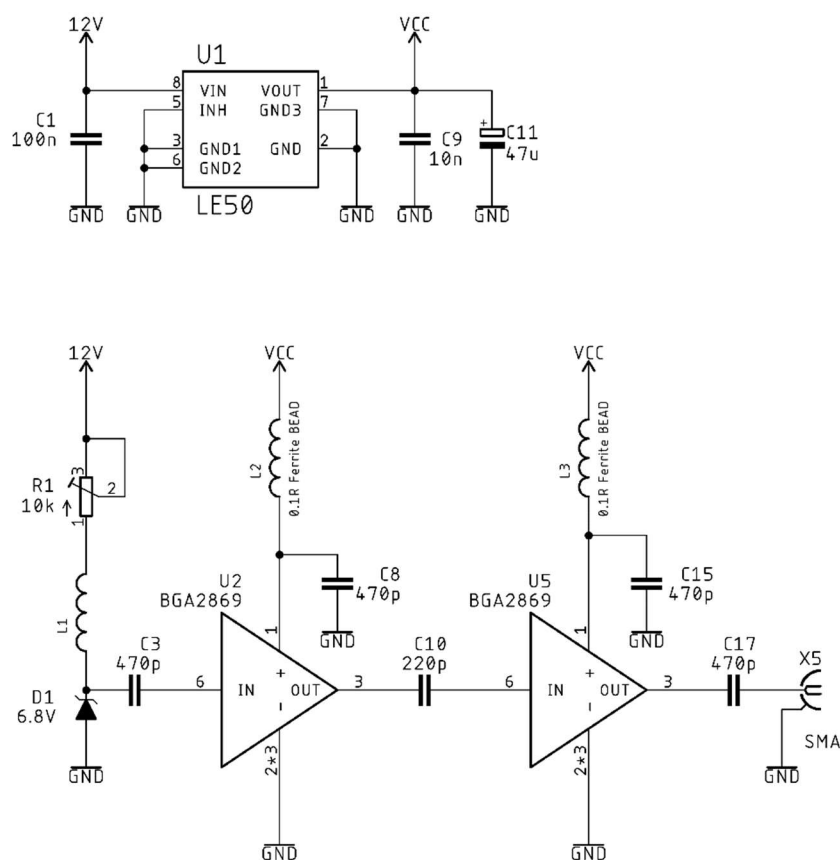


Obr. 3-2 Chyba servisnej potlače

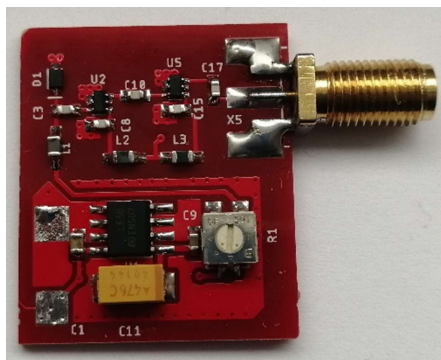
Na Obr. 3-2 je znázornená výrobná vada v potlačí DPS, kde určitá časť panelov mala chýbajúce označenie v jednom mieste. Na základe pozorovania nízkej kvality vyhotovenia prebehlo dodatočné elektrické premeranie panelov „prepísanie“, tak aby sa minimalizovalo riziko osadenia komponentov na nevyhovujúcu DPS.

3.1 Šumový generátor

Finálna realizácia šumového generátora vychádza z návrhu pomocou MMIO a zenerovej diódy, kde sú použité dva MMIO zosilňovače BGA2969 radené za sebou. Zisk jedného zosilňovača, udávaná výrobcom, je 32 dB. Schéma je doplnená o odrušovacie gorálky v napájaní a trimer, pomocou ktorého je možné ladit' prúd pretekajúci zenerovou diódou.

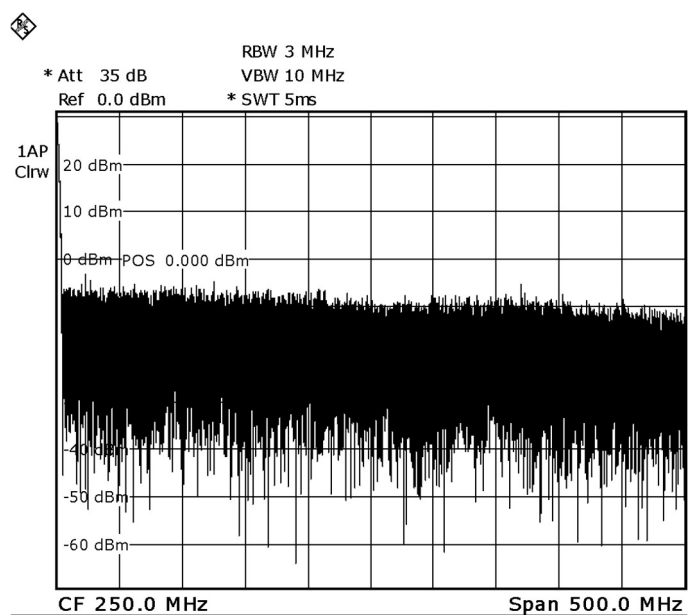


Obr. 3-3 Schéma šumového generátora s MMIO



Obr. 3-4 Osadená DPS šumového generátora

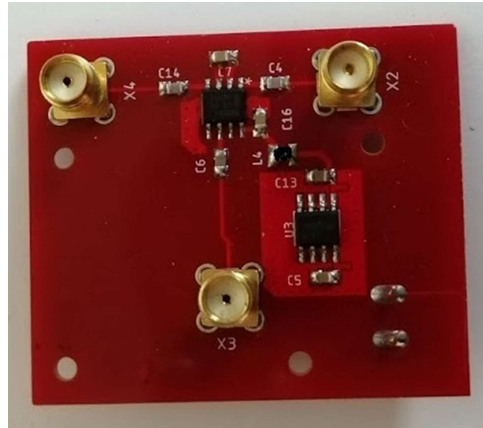
Doska šumového generátora (Obr. 3-4) je umiestnená do kovovej krabičky a prichytená k prednému panelu pomocou SMA panelového konektoru a matice s vejárovou podložkou. Spektrum od 1 MHz až 500 MHz sa navyše približuje ideálnemu bielemu šumu (Obr. 3-5).



Obr. 3-5 Výstup šumového generátora

3.2 RF zmiešavač

RF zmiešavač vychádza z teoretického návrhu, kde bola len rozmerovo upravená experimentálna doska. SMA hranové konektory boli nahradené kolmými, tak aby bolo možné dosku prichytiť k hornému panelu prípravku.



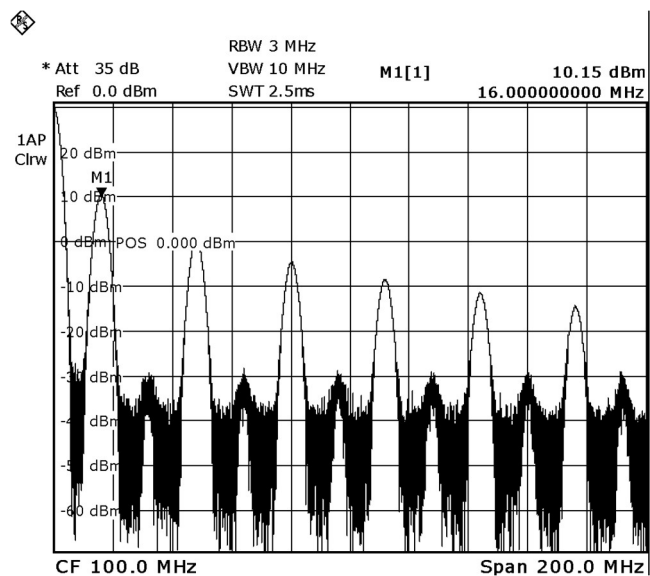
Obr. 3-6 Osadená doska RF zmiešavača

3.3 Zdroje periodických signálov

Zdroje periodických signálov sú podľa návrhu tvorené kryštálovými oscilátormi umiestnenými na DPS spolu s filtrom dolnej priepuste. Počas návrhu filtrov som sa dopustil hrubej chyby a overil si len dostupnosť vypočítaných hodnôt indukčnosti v SMD puzdre bez zváženia maximálnej frekvencie cievky. Touto chybou boli vybrané cievky ktoré sa nehodia na realizáciu filtra a filtre museli byť prepočítané, tak aby cievky mali menšie indukčnosti pri ktorých výrobca udáva vyššie vlastné rezonančné frekvencie.

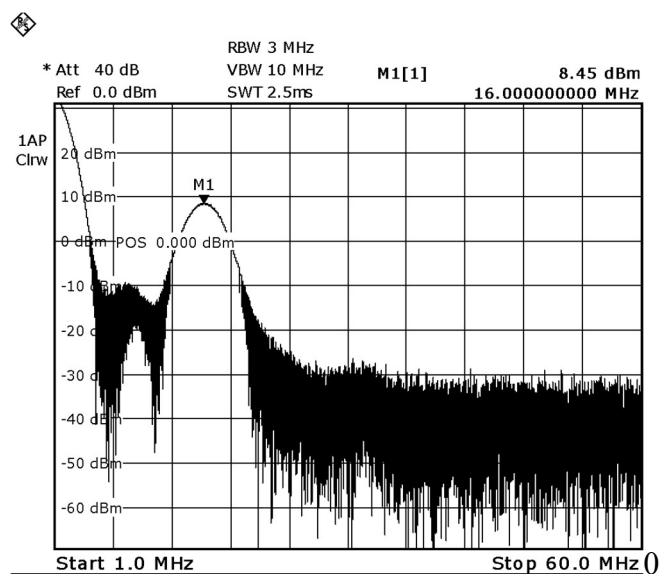


Obr. 3-7 Osadená doska zdrojov periodických signálov



Obr. 3-8 Spektrum výstupného signálu z oscilátora 16 MHz

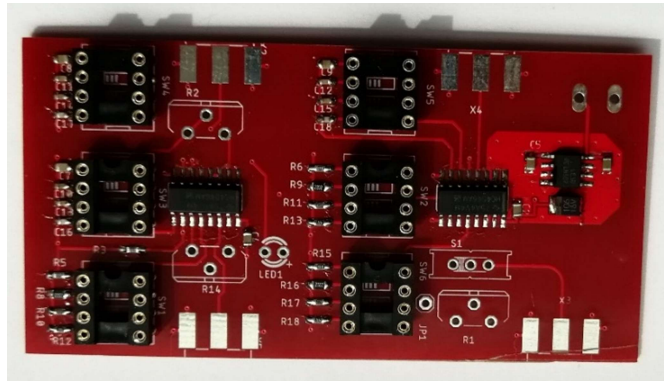
Na Obr. 3-8 je znázornené spektrum výstupného signálu z kryštálového oscilátora, kde sa teoreticky predpokladalo že oscilátor bude mať príliš malý výstupný signál pri záťaži impedanciou 50 Ω . Na základe merania bolo ale možné navrhnuť filter pre vstupnú impedanciu 50 Ω čo umožnilo využiť nižšie hodnoty indukčností zhruba o jednu dekádu.



Obr. 3-9 Výstup oscilátora 16 MHz po odfiltrovaní vyšších harmonických

3.4 Slučka fázového závesu a VCO

Pre potreby frekvenčnej modulácie a demodulácie spolu s generovaním signálov pomocou VCO boli podľa návrhu využité dva integrované obvody 74HC4046 umiestnené na jednej DPS (Obr. 3-10). Oproti teoretickému návrhu boli z dôvodu mechanickej robustnosti nahradené DIP prepínače klasickými posuvnými prepínačmi (Obr. 3-11) ktoré sú umiestnené na predný panel zariadenia. SMA konektory do DPS boli nahradené SMA konektormi do panelu a prepojené pomocou koaxiálneho kábla s DPS.

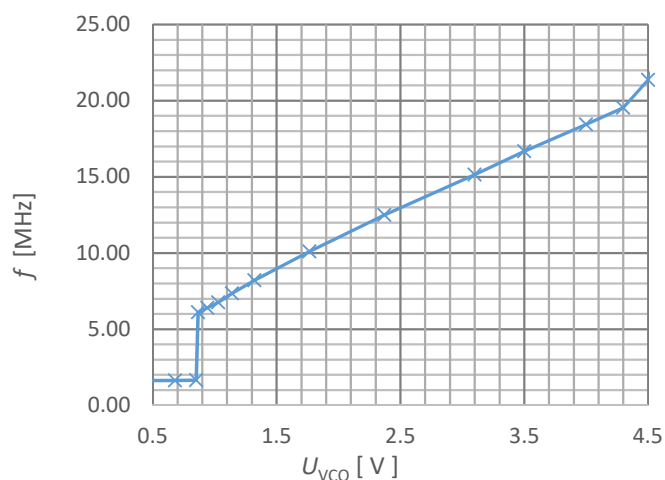


Obr. 3-10 Osadená doska modulu fázového závesu

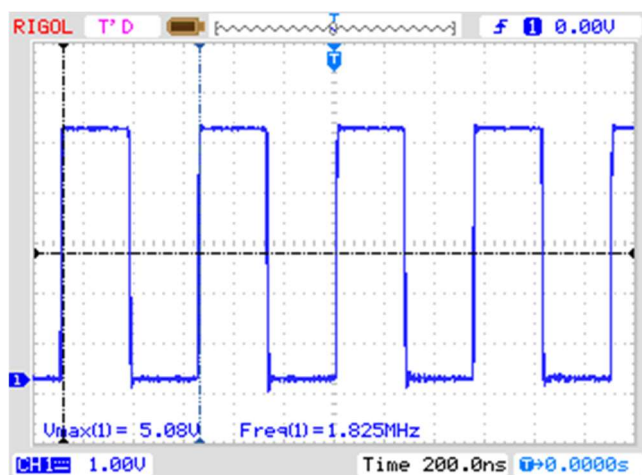


Obr. 3-11 Náhrada DIP prepínača

Na module fázového závesu a VCO budú študenti merať vplyv veľkosti kondenzátora C a odporov R_1 a R_2 na výstupnú frekvenciu VCO. Pozorovať schopnosť frekvenčnej modulácie, zavesenie PLL a následnej frekvenčnej demodulácie vstupného signálu.

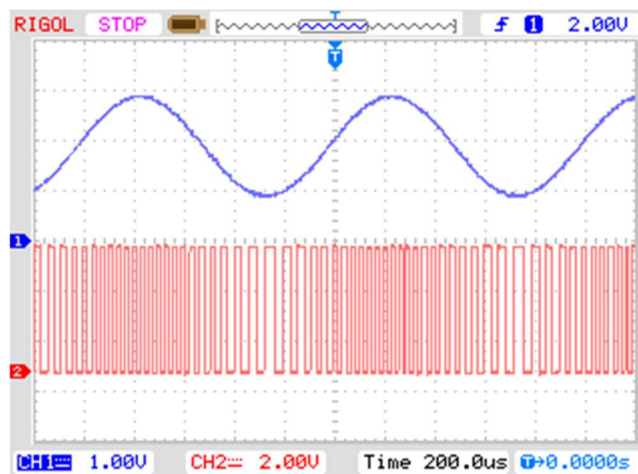


Obr. 3-12 Výstup VCO pri $C = 47$ pF



Obr. 3-13 Príklad výstupneho signálu z VCO

Na základe merania výstupnej frekvencie VCO v závislosti na U_{VCO} (Obr. 3-12) je výstupná frekvencia lineárne závislá v rozsahu 0,9 V až 4 V. Rovnako pre všetky použité veľkosti kondenzátorov C . VCO začína skokovo reagovať pri $U_{VCO} = 0,88$ V. S touto hodnotou bude následne potreba počítať pri použití modulu ako frekvenčný modulátor, kedy vstupný signál bude potreba napäťovo posunúť nahor minimálne o túto hodnotu (respektíve posadiť ho na DC offset). V opačnom prípade nebude VCO reagovať v potrebnom rozsahu a spodná pol vlna bude o túto hodnotu zrezaná. Na Obr. 3-14 je znázornená signál pred frekvenčnou moduláciou, kde je vstupný signál značne posunutý nahor. Maximálna úroveň by nemala presiahnuť napätie 4,5 V, keď že obvod VCO nad touto hodnotou začína byť nelineárne závislý na vstupnom (riadiacom) napätí.



Obr. 3-14 Príklad vstupného signálu z generátora pred frekvenčnou moduláciou (modrá) a modulovaný signál (červená)

3.5 Mechanické prevedenie

Dosky plošných spojov sú umiestnené do prístrojovej krabičky ktorá je vytlačená pomocou 3D tlačne. Na vrchnom paneli sa nachádzajú všetky potrebné ovládacie prvky ako sú posuvné prepínače voľby kapacít a rezistorov pre obvody 74HC4046, viac otáčkové potenciometre, SMA konektory jednotlivých blokov a banánové dierky, pripojenie voltmetra pre potreby merania U_{VCO} . Posuvné prepínače sú upevnené pomocou držiaka prepínačov a skrutiek v troch radoch. Prvý rad umožňuje voľbu veľkosti kapacity C_1 rezistora R_1 a R_2 prvého obvodu 74HC4046. Druhý rad prepínačov umožňuje voľbu C_1 a rezistora R_2 pre druhý obvod 74HC4046 slúžiaci ako demodulátor, tretí rad prepínačov volí veľkosť kapacity RC filtra v slučke PLL.



Obr. 3-15 Rozmiestnenie ovládacích prvkov na prednom paneli lab. prípravku

4. VZOROVÉ VYPRACOVANIE PROTOKOLU

Laboratórna úloha číslo:

Princípy generovania RF signálov

Meno:

Skupina:

Dátum merania:

4.1 Zadanie

Šumový generátor a zmiešavanie signálov:

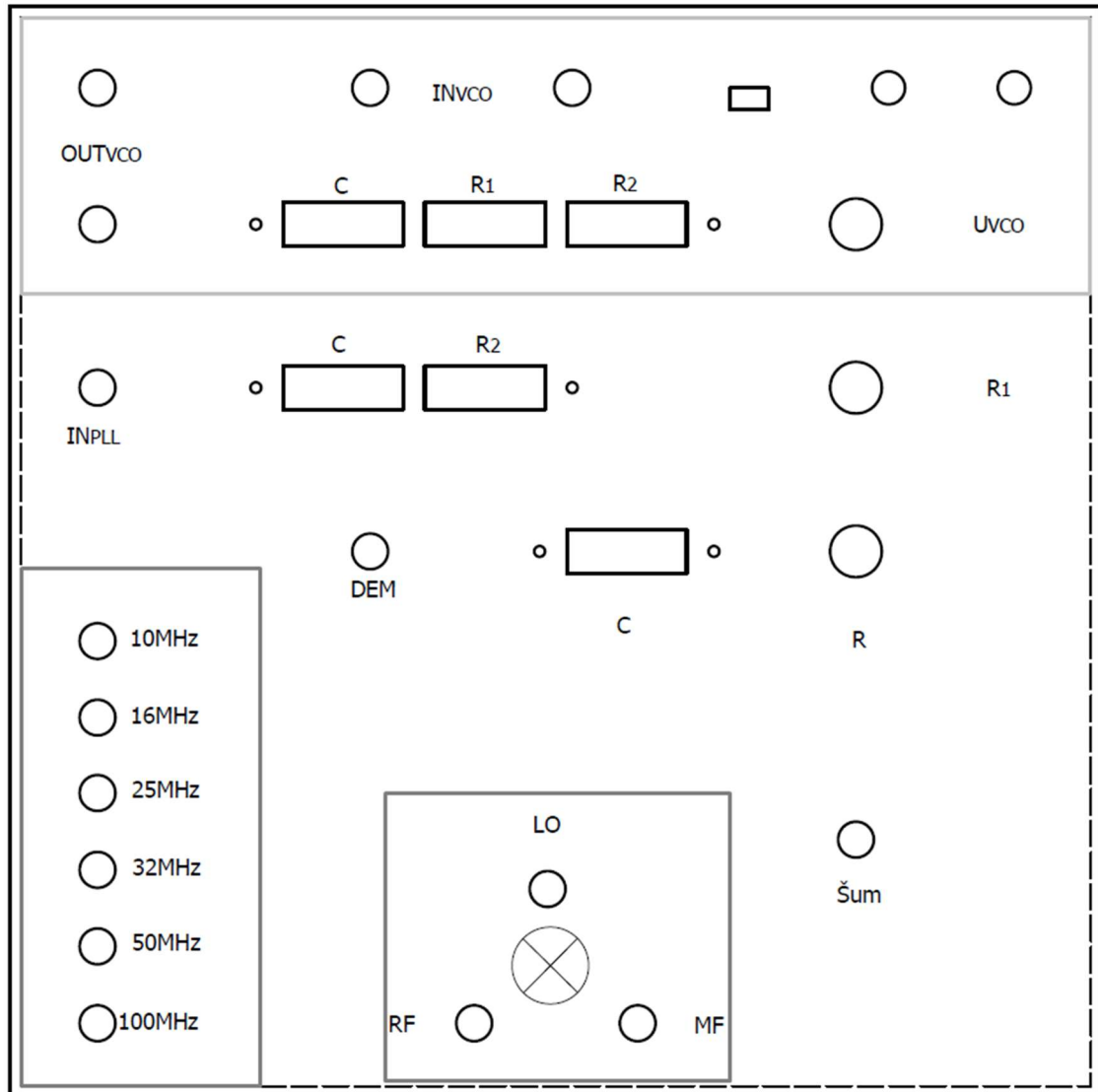
- Pomocou spektrálneho analyzátora zobrazte spektrum výstupného signálu šumového generátora a zmerajte jeho výkon na piatich rôznych frekvenciách (1-500 MHz).
- V rámci domácej prípravy vypočítajte očakávané frekvencie na výstupe zmiešavača pre prípad: $f_{LO}=10;16;25;32;50;100$ MHz $f_{RF} = 10;16;25;32;50;100$ MHz $m,n=1$.
- Pomocou prepojovacích káblov s SMA konektorom prepojte zdroje periodických signálov so vstupmi zmiešavača, na výstup pripojte spektrálny analyzátor a overte či sa hodnoty zhodujú s vypočítanými. Jednu z kombinácií zakreslite.

Fázový záves s 74HC4046:

- V rámci domácej prípravy vypočítajte minimálnu a maximálnu frekvenciu VCO v lineárnej oblasti pre $C = 820$ pF; 10 nF, $R_2 = 100$ k Ω , $R_1 = 22$ k Ω a 100 k Ω
- Zmerajte výstupnú závislosť f_{VCO} na U_{VCO} v rozsahu 0-5V pre všetky hodnoty $C = 47$ pF; 220 pF; 820 pF a 10 nF $R_2 = 100$ k Ω ; $R_1 = 4,7$ k Ω
- Vypočítané hodnoty overte meraním.
- Od akej hodnoty U_{VCO} začína VCO reagovať na zmenu? Aký dopad na výstupnú frekvenciu má zmena R_1 ?
- Na vstup IN_{VCO} pripojte generátor sínusového signálu 1 kHz 2 V_{p-p}, offset 1 V. Na prípravku zvolte $C = 10$ nF $R_1 = 22$ k Ω , $R_2 = 100$ k Ω a pomocou osciloskopu zobrazte výstupný signál. Následne prepojte výstup VCO zo vstupom IN_{PLL} . Kapacitu filtra DP nastavte na 10 nF. Na svorku DEM pripojte osciloskop a pozorujte zavesenie PLL pri zmene veľkosti odporu potenciometra R_1 . Zavesenie PLL bude indikované rozsvietením zelenej kontrolky na prednom paneli.
- Ako sa zmení signál v prípade že k offsetu signálu generátora pripočítame minimálne napätie U_{VCO} (kedy VCO začína reagovať na zmenu U_{VCO})?

4.2 Popis prípravku

Laboratórny prípravok obsahuje moduly pomocou ktorých je možné realizovať niekoľko typov zdrojov signálu a experimentálne si overiť reálne vlastnosti obvodu.



Obr. 4-1 Rozloženie predného panelu

V prvej časti prípravku sa nachádza obvod napätím riadeného oscilátora (VCO) ktorý je založený na obvode 74HC4046. Pomocou prepínačov C je možné voliť hodnoty: 47 pF, 220 pF, 820 pF a 10 nF. použitého kondenzátora, ktorý udáva frekvenčný rozsah VCO. Prepínače R_1 a R_2 umožňujú voľbu veľkosti rezistorov 4,7 k Ω , 8,2 k Ω ; 22 k Ω , 100 k Ω a majú dopad na minimálnu / maximálnu frekvenciu VCO ktorú je možné približne vypočítať pomocou nasledujúcich vzťahov (4.1), (4.2), kde $k \approx 10$:

$$f_{min} = \frac{k}{R_2(C+32pF)}, \quad (4.1)$$

$$f_{max} = f_{min} + \frac{k}{R_1(C+32pF)}. \quad (4.2)$$

V hornej časti sa nachádza prepínač pomocou ktorého je možné voliť medzi externým vstupom IN_{VCO} alebo priamym privedením napätia U_{VCO} (regulovateľné v rozsahu 0-5V pomocou potenciometra v pravej časti bloku).

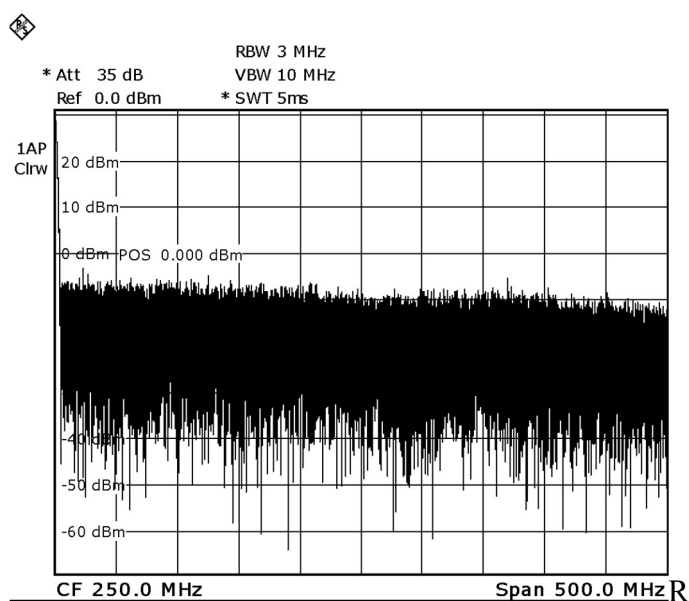
Pod blokom VCO sa nachádza slučka fázového závesu (PLL) ktorá je rovnako založená na obvode 74HC4046 a obsahuje rovnaké možnosti voľby C a R_2 s tou výnimkou, že hodnota R_1 sa nastavuje pomocou viacotáčkového potenciometra R_1 . Slučka fázového závesu je doplnená o možnosť zaradiť do spätnej väzby dolnú prepust' ktorej hodnoty C sa nastavujú v poslednom rade prepínačov. Veľkosť hodnoty R sa nastavuje rovnako pomocou potenciometra. V spodnej časti prípravku sa nachádzajú zdroje periodických signálov, generátor šumu a zmiešavač ktorý umožňuje transpozíciu frekvencií na iné hodnoty. Frekvencia výstupných signálov f_{MF} (4.3) závisí na frekvenciách vstupných signálov f_{RF}, f_{LO} a celočíselných konštánt m, n ktoré udávajú číslo harmonickej:

$$f_{MF} = |m \cdot f_{RF} + n \cdot f_{LO}|. \quad (4.3)$$

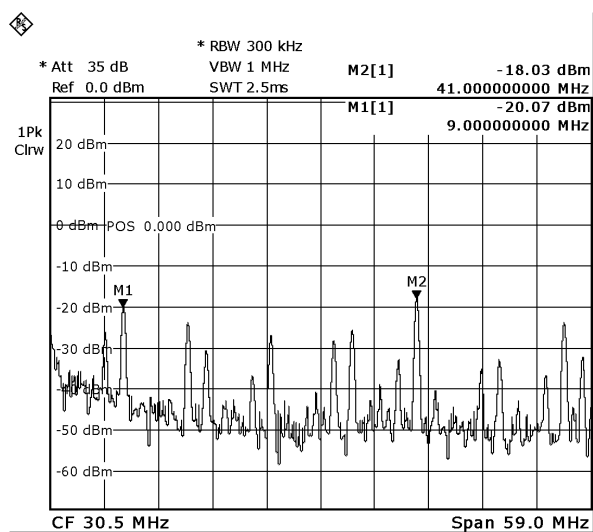
4.3 Vypracovanie

| f [MHz] | P [dBm] |
|-------------|-------------|
| 50 | -9,64 |
| 100 | -10,83 |
| 200 | -11,31 |
| 300 | -11,56 |
| 450 | -11,48 |

Tab. 4-1 Namerané hodnoty na výstupe šumového generátora



Obr. 4-2 Spektrum na výstupe šumového generátora



Date: 9.APR.2019 19:03:33

Obr. 4-3 Spektrum f_{MF} pre $f_{LO}=16$ MHz $f_{RF}=25$ MHz

| f_{LO} [MHz] | f_{RF} [MHz] | $f_{MF} = f_{LO} + f_{RF}$ [MHz] | $f_{MF} = f_{LO} - f_{RF}$ [MHz] |
|----------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 100 | 10 | 110 | 90 |
| 100 | 16 | 116 | 84 |
| 100 | 24 | 124 | 76 |
| 100 | 32 | 132 | 68 |
| 100 | 50 | 150 | 50 |
| 50 | 10 | 60 | 40 |
| 50 | 16 | 66 | 34 |
| 50 | 24 | 74 | 26 |
| 50 | 32 | 82 | 18 |
| 50 | 100 | 150 | 50 |
| 32 | 10 | 42 | 22 |
| 32 | 16 | 48 | 16 |
| 32 | 24 | 56 | 8 |
| 32 | 50 | 82 | 18 |
| 32 | 100 | 132 | 68 |
| 24 | 10 | 34 | 14 |
| 24 | 16 | 40 | 8 |
| 24 | 32 | 56 | 8 |
| 24 | 50 | 74 | 26 |
| 24 | 100 | 124 | 76 |
| 16 | 10 | 26 | 6 |
| 16 | 24 | 40 | 8 |
| 16 | 32 | 48 | 16 |
| 16 | 50 | 66 | 34 |
| 16 | 100 | 116 | 84 |
| 10 | 16 | 26 | 6 |
| 10 | 24 | 34 | 14 |
| 10 | 32 | 42 | 22 |
| 10 | 50 | 60 | 40 |
| 10 | 100 | 110 | 90 |

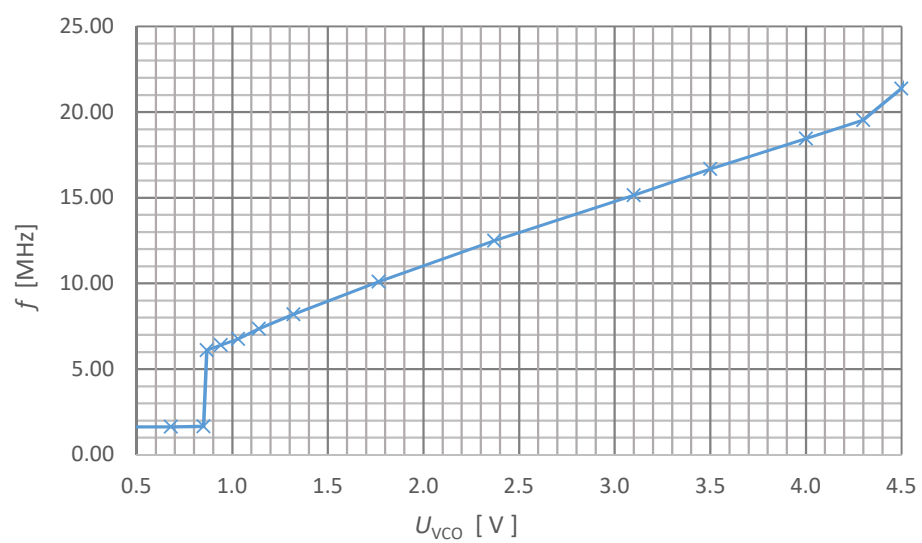
Tab. 4-2 Tabuľka vypocítaných kombinačných produktov

| C = 47 pF | | |
|-----------|---------------|-----------------|
| č.merania | U_{VCO} [V] | f_{VCO} [MHz] |
| 1 | 0.0 | 1.63 |
| 2 | 0.2 | 1.63 |
| 3 | 0.3 | 1.63 |
| 4 | 0.7 | 1.63 |
| 5 | 0.9 | 1.65 |
| 6 | 0.9 | 6.10 |
| 7 | 0.9 | 6.41 |
| 8 | 1.0 | 6.75 |
| 9 | 1.1 | 7.35 |
| 10 | 1.3 | 8.20 |
| 11 | 1.8 | 10.10 |
| 12 | 2.4 | 12.50 |
| 13 | 3.1 | 15.15 |
| 14 | 3.5 | 16.67 |
| 15 | 4.0 | 18.45 |
| 16 | 4.3 | 19.53 |
| 17 | 4.5 | 21.37 |
| 18 | 4.7 | 27.03 |
| 19 | 4.9 | 28.09 |
| 20 | 5.0 | 28.09 |

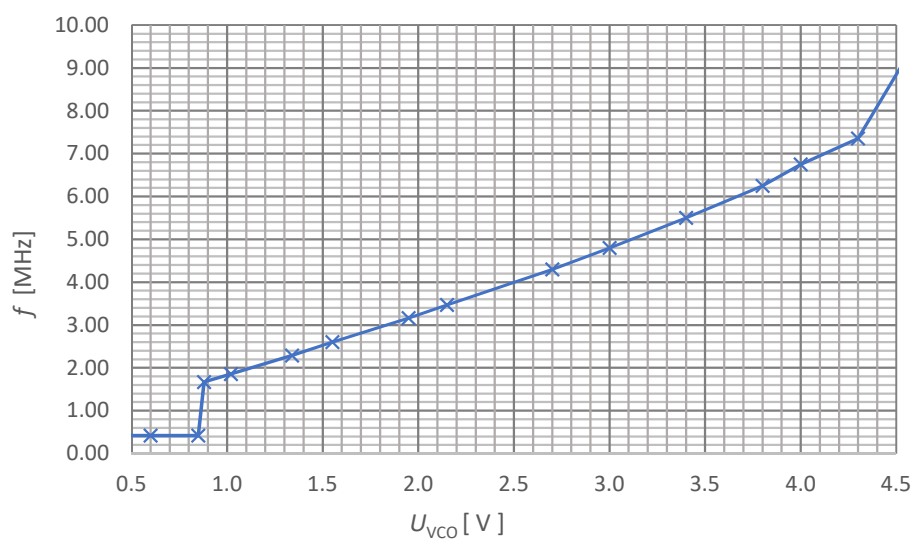
| C = 220 pF | | |
|------------|---------------|-----------------|
| č.merania | U_{VCO} [V] | f_{VCO} [MHz] |
| 1 | 0.0 | 0.42 |
| 2 | 0.5 | 0.42 |
| 3 | 0.6 | 0.42 |
| 4 | 0.9 | 0.42 |
| 5 | 0.9 | 1.67 |
| 6 | 1.0 | 1.85 |
| 7 | 1.3 | 2.29 |
| 8 | 1.6 | 2.60 |
| 9 | 2.0 | 3.16 |
| 10 | 2.2 | 3.47 |
| 11 | 2.7 | 4.30 |
| 12 | 3.0 | 4.80 |
| 13 | 3.4 | 5.50 |
| 14 | 3.8 | 6.25 |
| 15 | 4.0 | 6.75 |
| 16 | 4.3 | 7.35 |
| 17 | 4.6 | 9.60 |
| 18 | 4.7 | 15.60 |
| 19 | 4.9 | 20.00 |
| 20 | 5.0 | 21.64 |

| $C = 820 \text{ pF}$ | | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| č.merania | $U_{VCO} \text{ [V]}$ | $f_{VCO} \text{ [MHz]}$ |
| 1 | 0.0 | 0.12 |
| 2 | 0.1 | 0.12 |
| 3 | 0.5 | 0.12 |
| 4 | 0.9 | 0.12 |
| 5 | 0.9 | 0.48 |
| 6 | 1.0 | 0.53 |
| 7 | 1.4 | 0.70 |
| 8 | 1.8 | 0.83 |
| 9 | 2.1 | 1.00 |
| 10 | 2.2 | 1.09 |
| 11 | 2.7 | 1.30 |
| 12 | 3.0 | 1.47 |
| 13 | 3.5 | 1.78 |
| 14 | 4.0 | 2.17 |
| 15 | 4.3 | 2.60 |
| 16 | 4.5 | 2.94 |
| 17 | 4.7 | 5.00 |
| 18 | 4.7 | 7.70 |
| 19 | 4.9 | 12.50 |
| 20 | 5.0 | 17.00 |

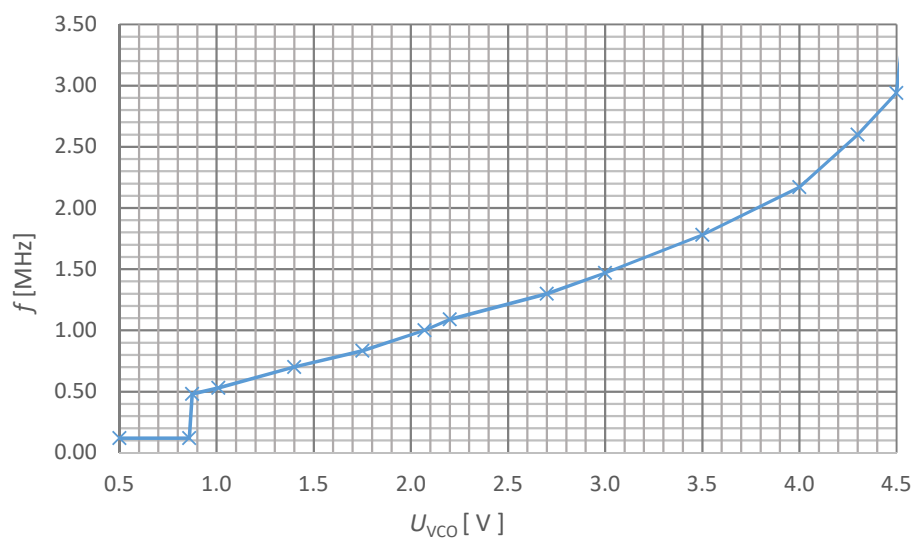
| $C = 10 \text{ nF}$ | | |
|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| č.merania | $U_{VCO} \text{ [V]}$ | $f_{VCO} \text{ [MHz]}$ |
| 1 | 0.0 | 0.009 |
| 2 | 0.1 | 0.009 |
| 3 | 0.3 | 0.009 |
| 4 | 0.5 | 0.009 |
| 5 | 0.9 | 0.009 |
| 6 | 0.9 | 0.038 |
| 7 | 0.9 | 0.040 |
| 8 | 1.1 | 0.045 |
| 9 | 1.2 | 0.049 |
| 10 | 1.4 | 0.057 |
| 11 | 1.8 | 0.070 |
| 12 | 2.0 | 0.083 |
| 13 | 2.4 | 0.094 |
| 14 | 2.8 | 0.118 |
| 15 | 3.5 | 0.154 |
| 16 | 4.1 | 0.196 |
| 17 | 4.5 | 0.307 |
| 18 | 4.8 | 1.560 |
| 19 | 4.9 | 3.000 |
| 20 | 5.0 | 20.600 |



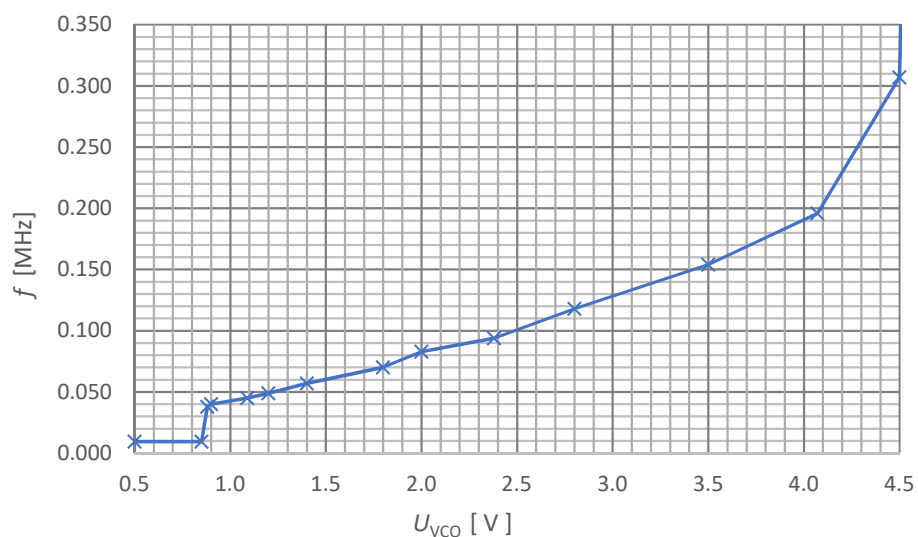
Obr. 4-4 Závislosť f_{VCO} na U_{VCO} pre $C = 47$ pF



Obr. 4-5 Závislosť f_{VCO} na U_{VCO} pre $C = 220$ pF



Obr. 4-6 Závislosť f_{VCO} na U_{VCO} pre $C = 820$ pF



Obr. 4-7 Závislosť f_{VCO} na U_{VCO} pre $C = 10$ nF

Príklad výpočtu f_{min} a f_{max} pre $C = 820$ pF $R_1 = 22$ k Ω $R_2 = 100$ k Ω :

$$f_{min} = \frac{k}{R_2(C + 32pF)} = \frac{10}{100 \cdot 10^3(820 \cdot 10^{-12} + 32 \cdot 10^{-12})} = 117.37 \text{ kHz}$$

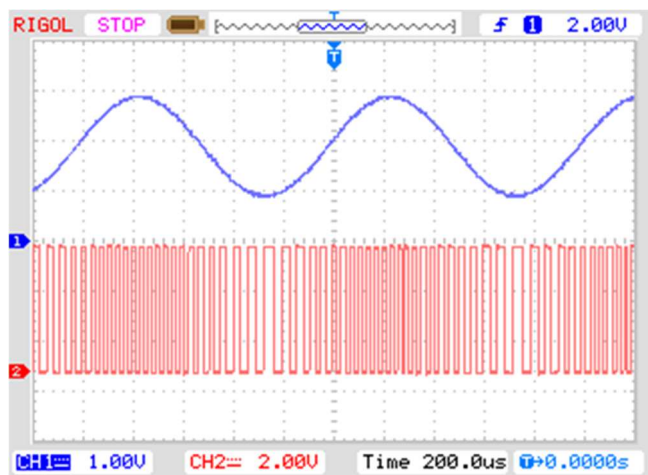
$$f_{max} = f_{min} + \frac{k}{R_1(C + 32pF)} = f_{min} + \frac{10}{22 \cdot 10^3(820 \cdot 10^{-12} + 32 \cdot 10^{-1})} = 650.87 \text{ kHz}$$

| | C=820 pF | | C=10nF | |
|------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| R_1 | 22 k Ω | 100 k Ω | 22 k Ω | 100 k Ω |
| f_{\min} [kHz] | 117.37 | 117.37 | 9.97 | 9.97 |
| f_{\max} [kHz] | 650.87 | 234.74 | 55.28 | 19.94 |

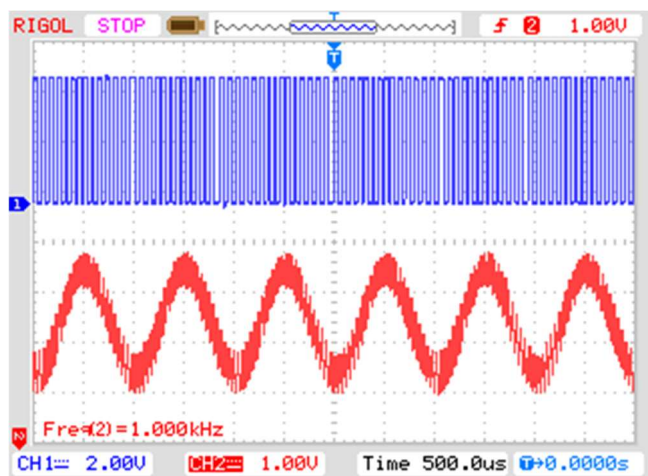
Tab. 4-3 Tabuľka vypočítaných hodnôt f_{\min} a f_{\max}

| | C=820 pF | | C=10nF | |
|------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| R_1 | 22 k Ω | 100 k Ω | 22 k Ω | 100 k Ω |
| f_{\min} [kHz] | 117.8 | 117.8 | 10 | 10 |
| f_{\max} [kHz] | 588.87 | 227.3 | 51 | 19.08 |

Tab. 4-4 Tabuľka nameraných hodnôt f_{\min} a f_{\max}



Obr. 4-8 Využitie VCO ako FM modulátora



Obr. 4-9 PLL ako FM demodulátor

Vypočítané hodnoty f_{\min} a f_{\max} sa približujú nameraným hodnotám, kde na základe merania môžeme teoretickú hodnotu f_{\min} považovať za totožnú s nameranou. Maximálna frekvencia je mierne odlišná od teoretickej hodnoty čo je spôsobené linearitou VCO iba do približne 4,5 V. V prípade neposunutia vstupného signálu nad hodnotu 0,88-0,9 V, kedy VCO začína reagovať, sa bude výstupná frekvencia pohybovať mimo lineárnu oblasť VCO čo má za následok skreslenie signálu po následnej demodulácii. Tvar výstupného signálu ovplyvňuje filter DP a frekvenčný rozsah modulátora, v prípade zaradenia kapacity $C = 220$ pF v obvode VCO a PLL bude výstupný signál hladší.

5. ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo navrhnutie a vytvorenie laboratórneho prípravku na ktorom bude možné demonštrovať realizáciu rôznych zdrojov signálu. Prípravok je rozdelený do nasledujúcich samostatných blokov: šumový generátor, zdroje periodických signálov 10, 16, 25, 50, 100 MHz, zmiešavač a obvod PLL ktorý je prispôsobený na generáciu signálov pomocou VCO, frekvenčnú moduláciu a demoduláciu. Moduly sú na sebe nezávislé a je možné ich medzi sebou prepájať pomocou SMA konektorov. Moduly sú vyhotovené na obojstranných doskách plošných spojov kde sú osadené SMD komponenty, ktoré umožňujú ľahkú dostupnosť na trhu. Na doskách sa rovnako nachádza servisná potlač ktorá v prípade potreby zjednodušuje servisovateľnosť laboratórneho prípravku. Značná časť práce je venovaná samotným meraniam obvodov kde bolo potreba overiť nasimulované a reálne vlastni prípravku. K laboratórnemu prípravku bola následne vytvorená demonštračná úloha v ktorej je možné experimentálne sa zoznámiť s navrhnutými blokmi. Úloha je koncipovaná prevažne na praktické zručnosti zo spektrálnym analyzátorom a osciloskopom a z rovnakého dôvodu sa na prednom paneli vyskytujú výhradne SMA konektory s ktorými sa bežne stretáme v praxi. Samotný prípravok umožňuje vysokú voľnosť v experimentovaní a v prípade doplnenia o filtre pásmových prepusti je možné na prípravku realizovať ešte experimenty s AM moduláciou a demoduláciou.

Literatúra

- [1] HANUS, Stanislav a Jiří SVAČINA. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika: přednášky*. 2. Brno: Vysoké učení technické, 2004. ISBN 80-214-2222-X.
- [2] DOSTÁL, Tomáš. *Teorie obvodů: Elektronická skripta*. B.m.: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [3] NDK - NIHON DEMPA KOGYO CO., LTD. [online]. [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <http://www.ndk.com/en/environment/development/index.html>
- [4] SEIKO EPSON CORPORATION. *Circuit Design for Crystal Oscillator Peripheral Circuits Circuit Design Guide for Noise Reduction* [online]. no date [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: https://www5.epsondevice.com/en/information/technical_info/pdf/tech_notes_circuit_design20140624.pdf
- [5] VÁGNER, Petr. *Vysokofrekvenční technika* [online]. 2nd vyd. B.m.: Vysoké učení technické v Brně, 2013. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83307
- [6] IAN POOLE. *Understand RF Mixing - RF Multiplication | Electronics Notes* [online]. [cit. 2018-10-08]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-mixer/rf-mixing-basics.php>
- [7] MICROWAVES & RF. *RF Mixers Pine For Linearity And Dynamic Range* [online]. [cit. 2018-10-20]. Dostupné z: <https://www.mwrf.com/active-components/rf-mixers-pine-linearity-and-dynamic-range>
- [8] IAN POOLE. *What is a Gilbert Cell Mixer | Electronics Notes* [online]. [cit. 2018-10-17]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-mixer/gilbert-cell-rf-mixer.php>
- [9] TEXAS INSTRUMENTS INC. *LOOP_FILTER-CALC Loop Filter Calculation Tool | TI.com* [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: http://www.ti.com/tool/LOOP_FILTER-CALC
- [10] IAN POOLE. *PLL Phase Locked Loop: How it Works | Electronics Notes* [online]. [cit. 2018-10-08]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/pll-phase-locked-loop/tutorial-primer-basics.php>
- [11] NXP SEMICONDUCTORS. *BFG425W NPN 25 GHz wideband transistor* [online]. 2010 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BFG425W.pdf>
- [12] PHILIPS SEMICONDUCTORS. *Appendix RF Manual 6 th edition* [online]. 2005 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: doi:939775015125
- [13] ON SEMICONDUCTORS. *MMSZ2V4T1 - Zener Voltage Regulators. MMSZ2V4T1/D* [online]. 2012 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <http://onsemi.com>
- [14] NXP SEMICONDUCTORS. *BGA2800 - Product data sheet* [online]. 2015 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BGA2800.pdf>
- [15] NXP SEMICONDUCTORS. *BGA2867 - Product data sheet* [online]. 2016 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BGA2867.pdf>
- [16] NXP SEMICONDUCTORS. *General description SA602A Double-balanced mixer and oscillator* [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/SA602A.pdf>

- [17] IQD FREQUENCY PRODUCTS. *CFPS-73 Crystal Clock Oscillator Specification* [online]. 2016 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: www.iqdfrequencyproducts.com
- [18] RF TOOLS. *RF Tools | LC Filters Design Tool* [online]. [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <https://rf-tools.com/lc-filter/>
- [19] NEXPERIA. *General description 74HC4046A; 74HCT4046A Phase-locked loop with VCO* [online]. [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT4046A.pdf

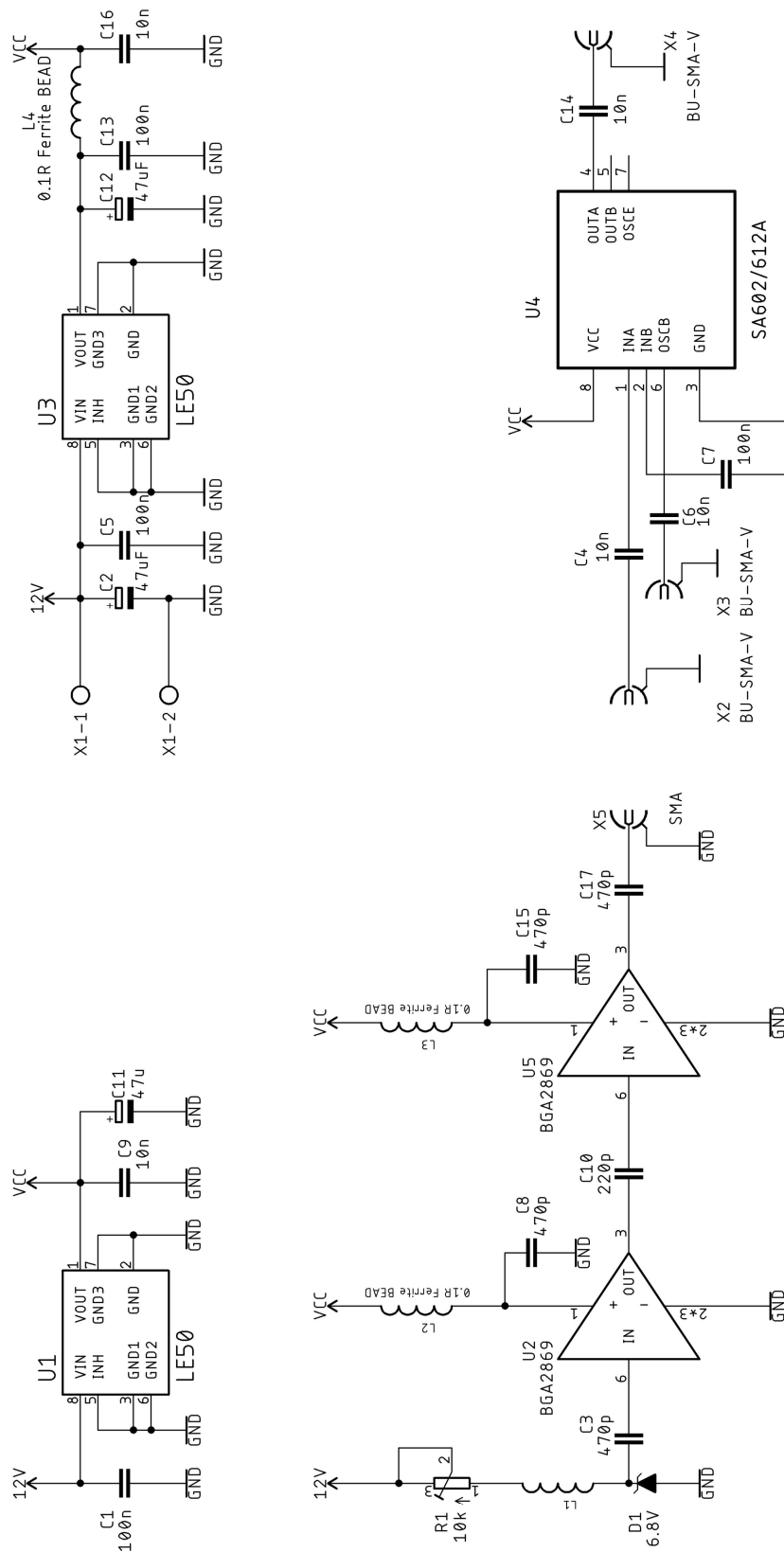
Zoznam príloh

| | | |
|-------------|---|----|
| Príloha A - | Schéma zapojenia panela šumového generátora a zmiešavača | 56 |
| Príloha B - | Návrhové podklady panelu šumového generátora a zmiešavača | 57 |
| Príloha C - | Osadzovací plán panelu šumového generátora a zmiešavača | 58 |
| Príloha D - | Schéma zapojenia modulu PLL..... | 59 |
| Príloha E - | Schéma zapojenia oscilátorov | 60 |
| Príloha F - | Návrhové podklady panelu PLL a oscilátorov | 61 |
| Príloha G - | Osadzovací plán panelu PLL a oscilátorov strana TOP | 62 |
| Príloha H - | Osadzovací plán panelu PLL a oscilátorov strana BOTTOM..... | 63 |

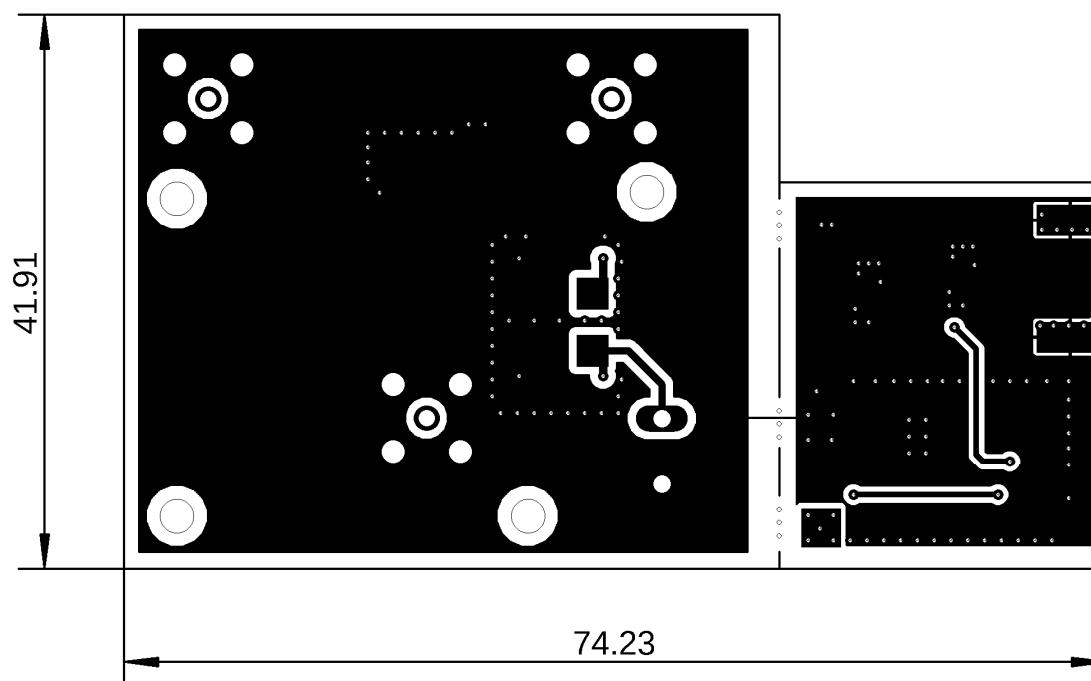
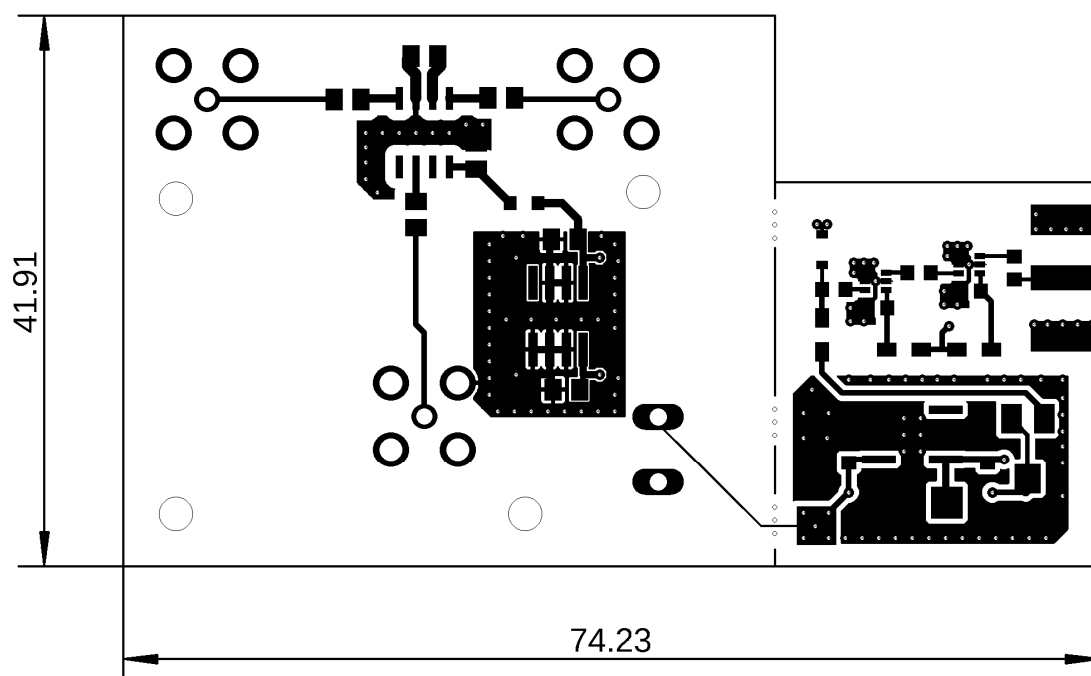
Zoznam príloh na CD

| | | |
|-------------|----------------------------------|----|
| Príloha I - | Prázdny protokol merania..... | 64 |
| Príloha J - | Návrhové podklady krabičky | 64 |

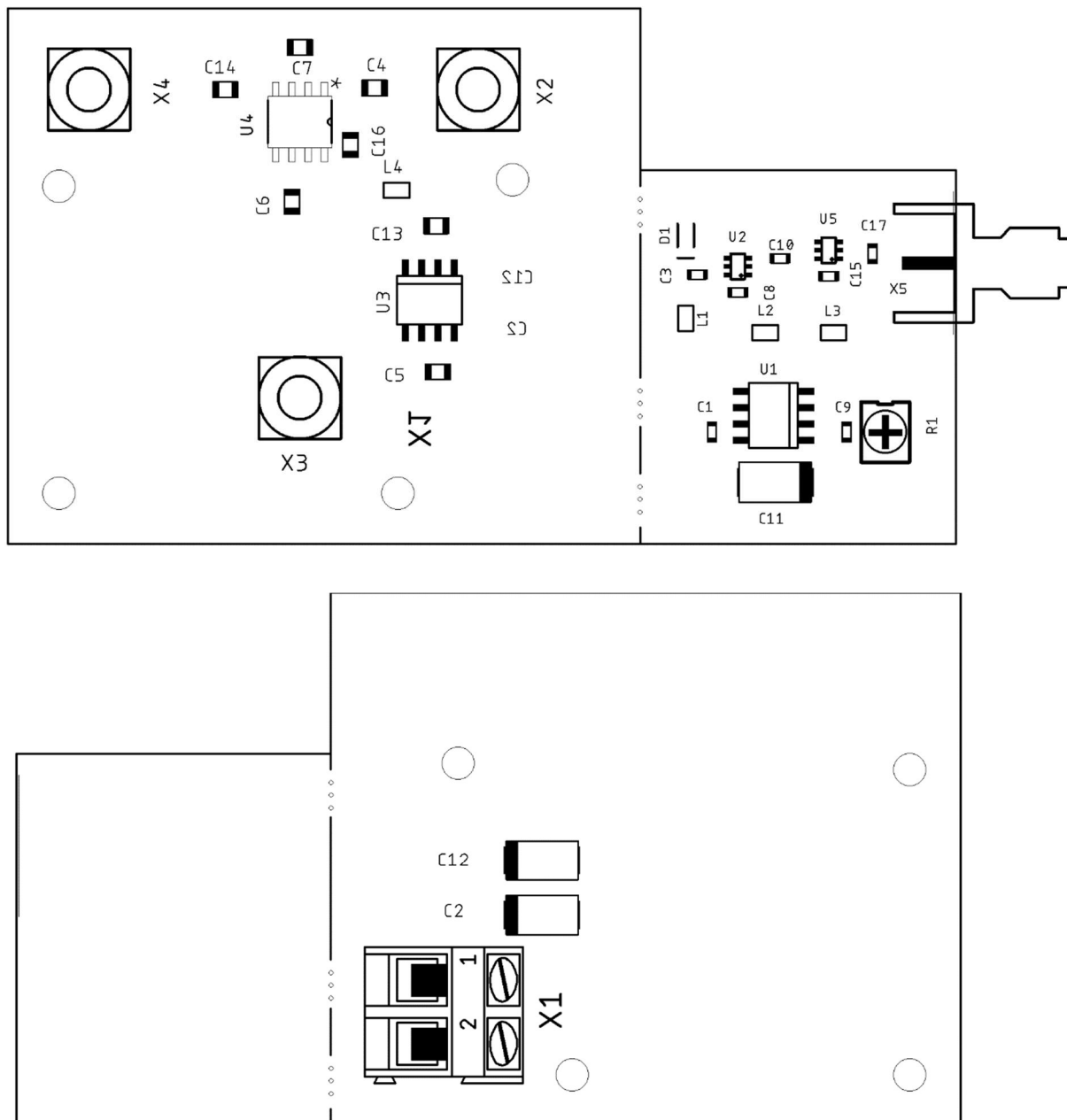
Príloha A - Schéma zapojenia panela šumového generátora a zmiešavača



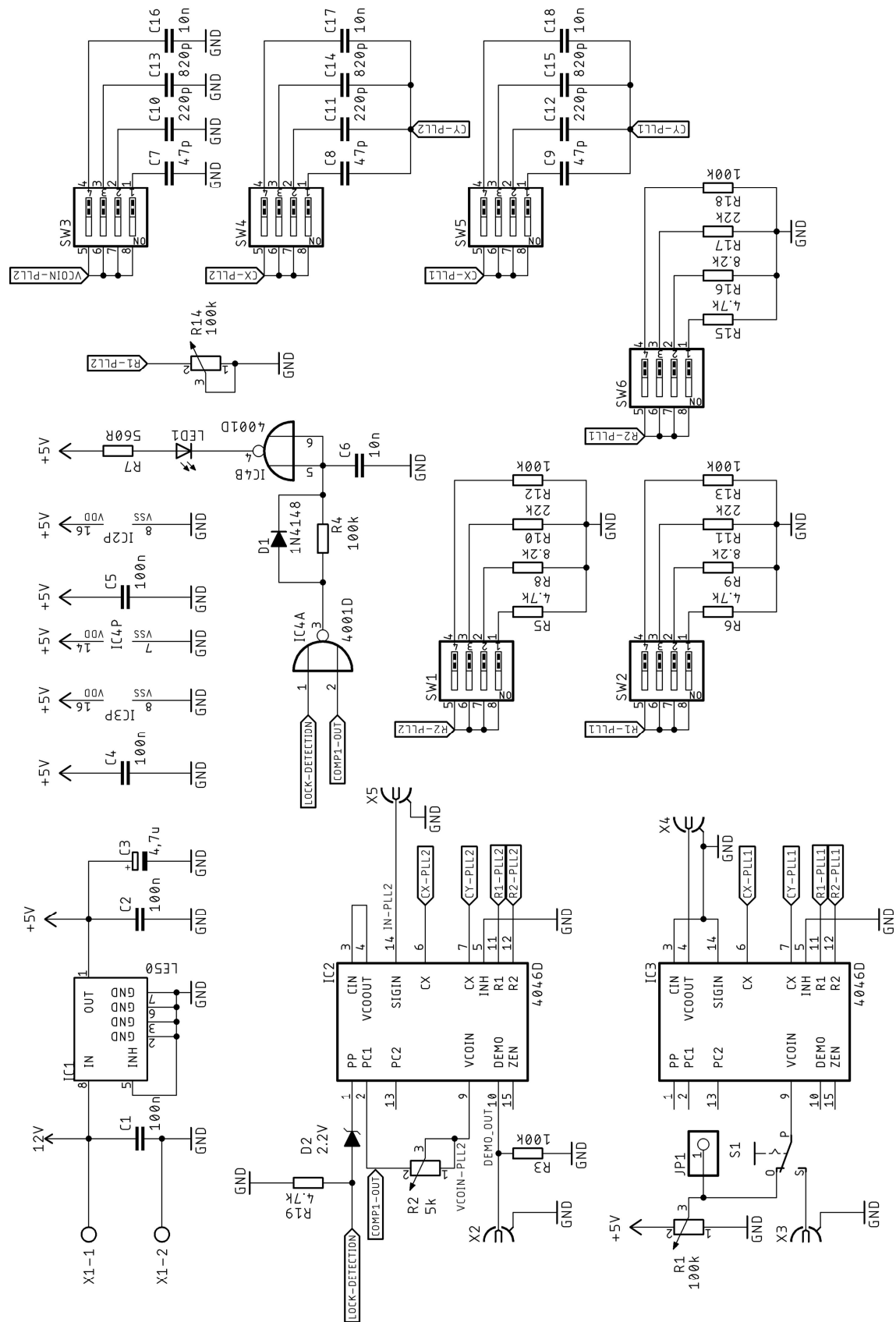
Príloha B - Návrhové podklady panelu šumového generátora a zmiešavača



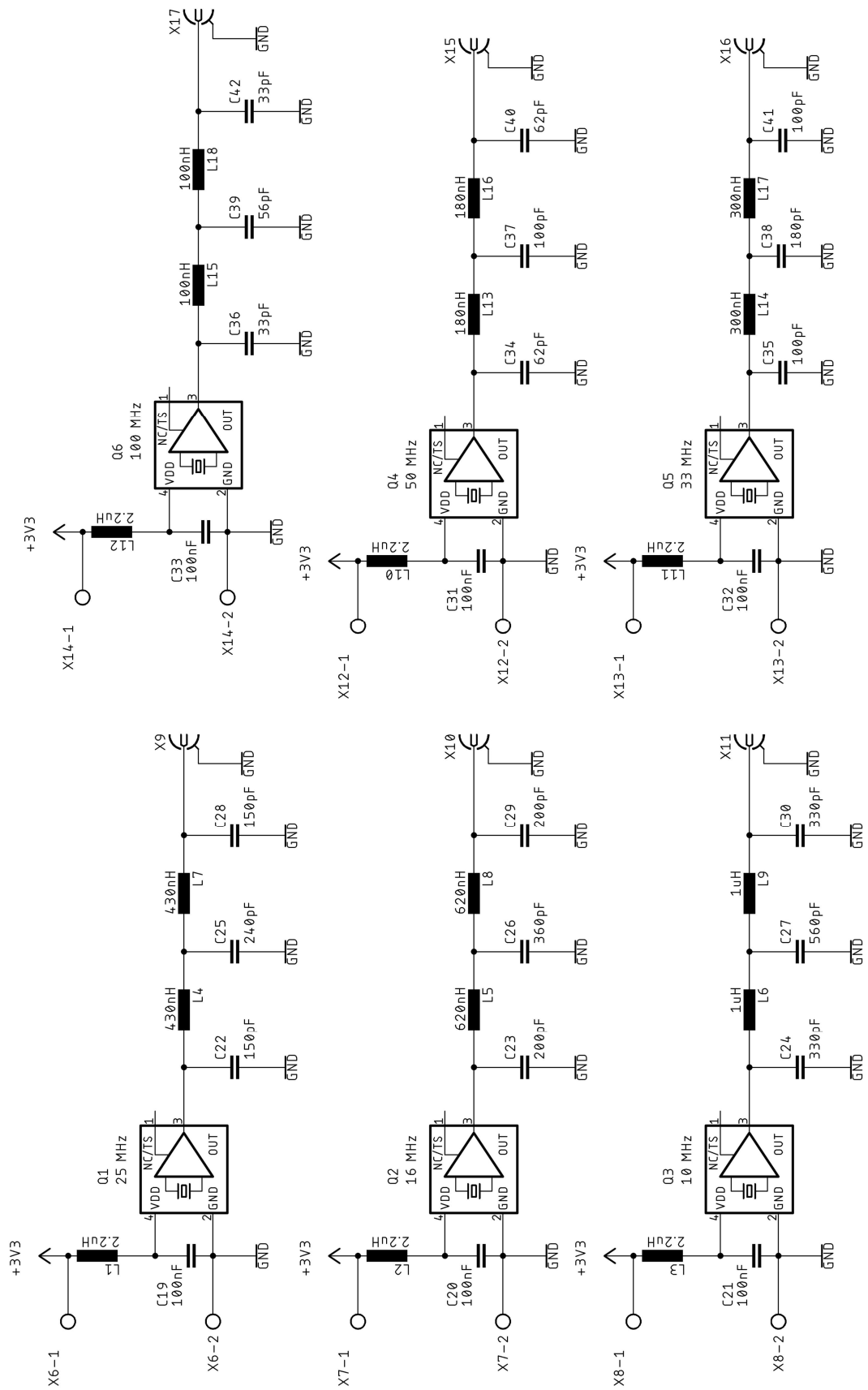
Príloha C - Osadzovací plán panelu šumového generátora a zmiešavača



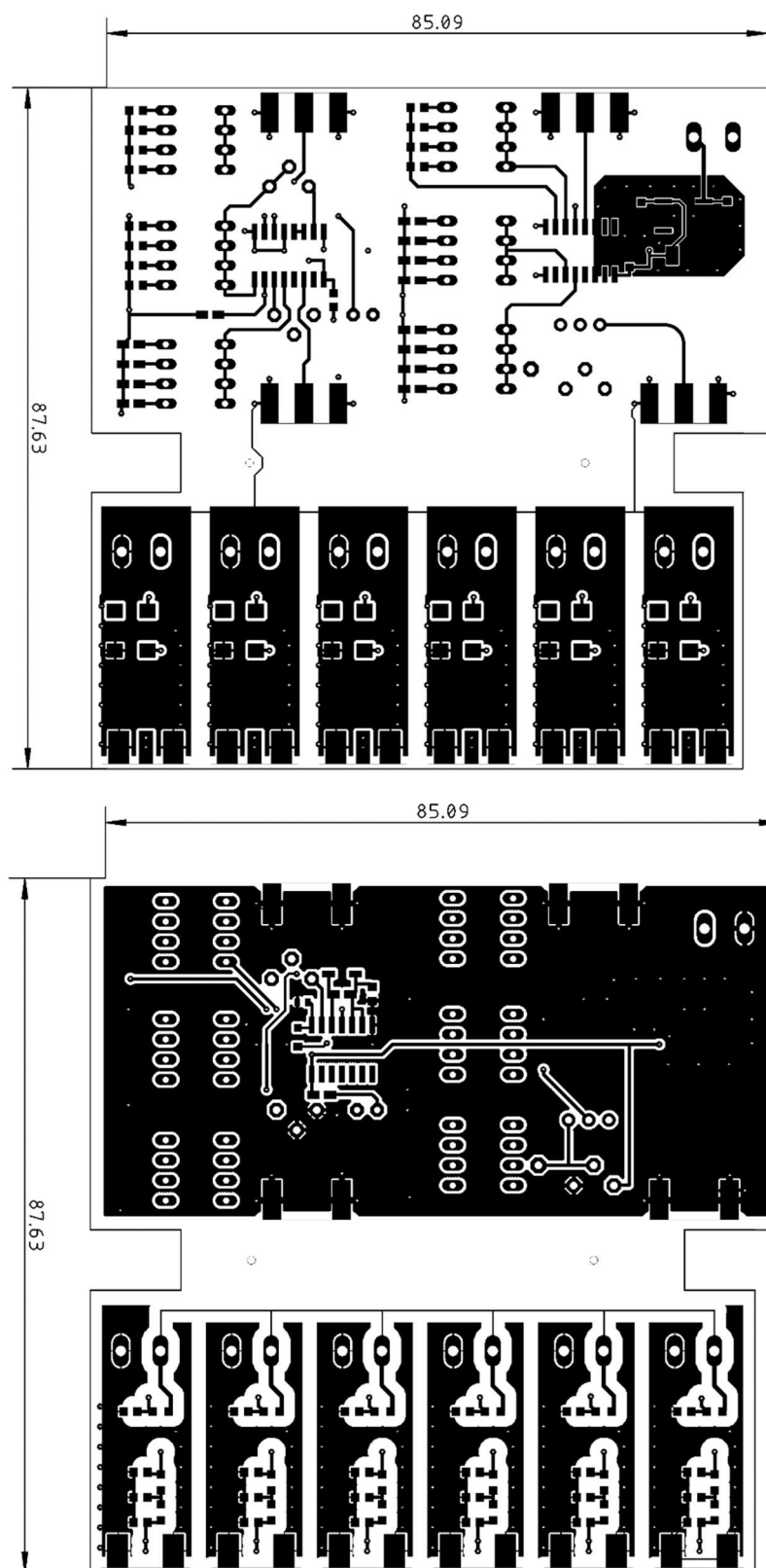
Príloha D - Schéma zapojenia modulu PLL



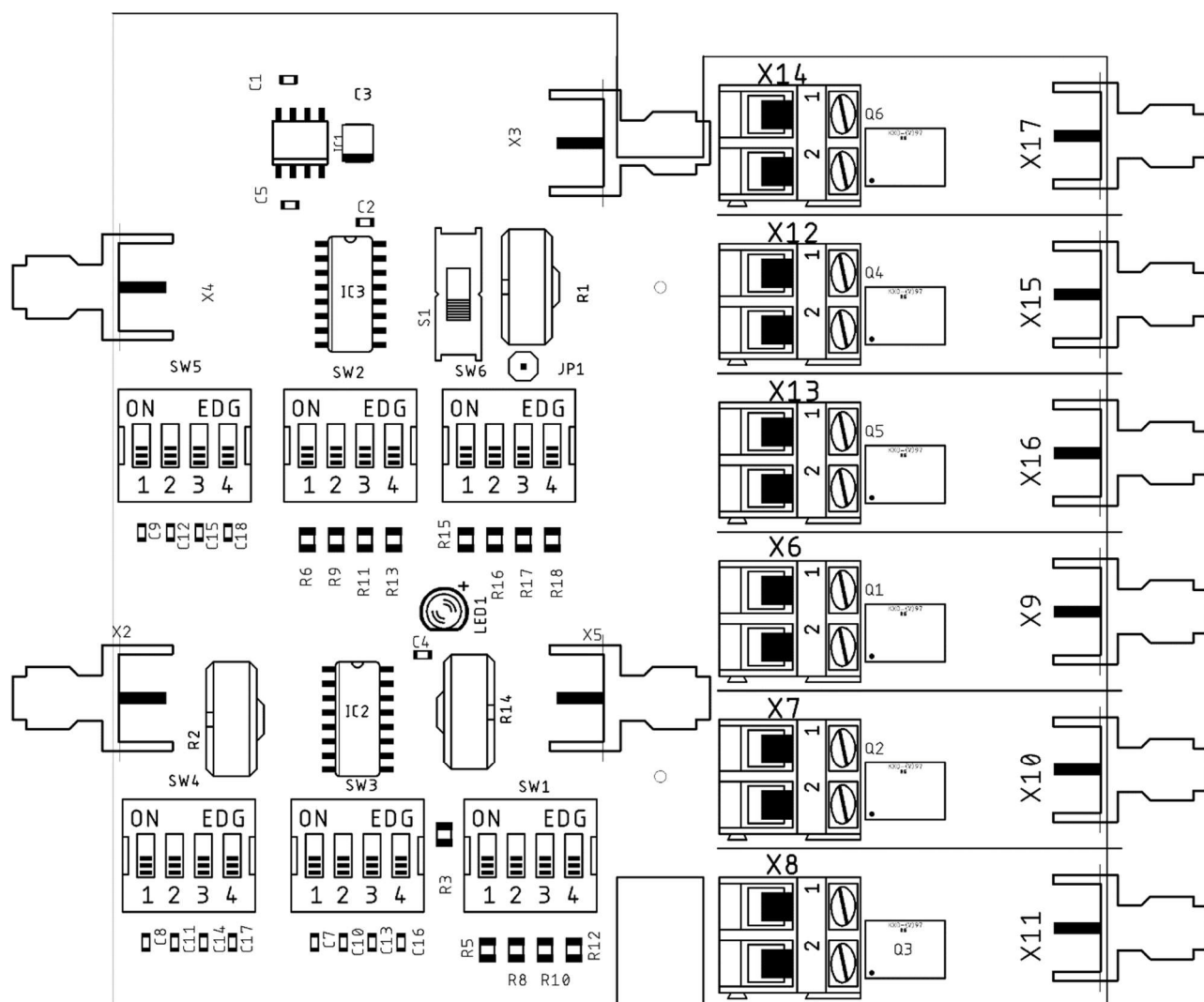
Príloha E - Schéma zapojenia oscilátorov



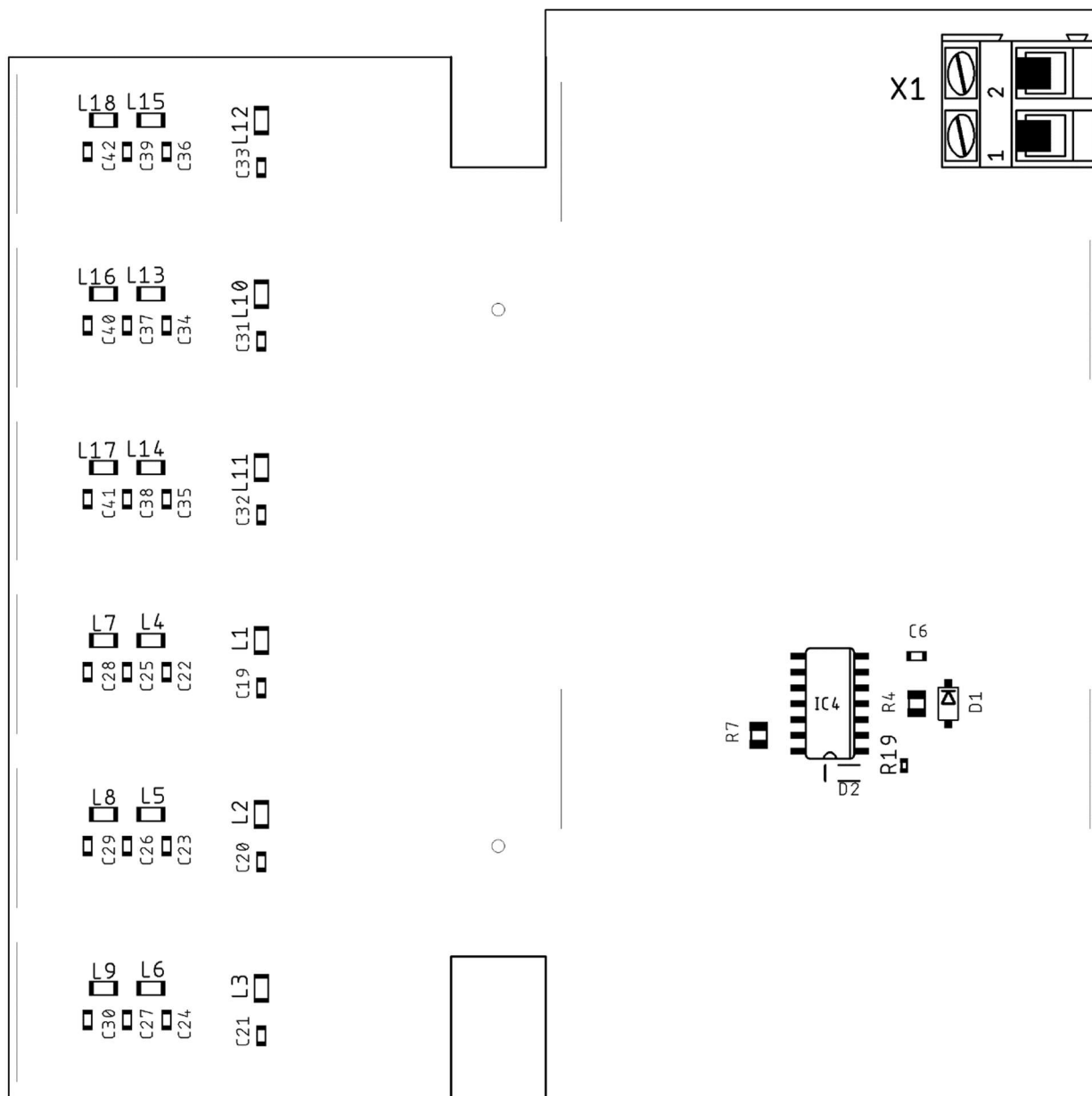
Príloha F - Návrhové podklady panelu PLL a oscilátorov



Príloha G - Osadzovací plán panelu PLL a oscilátorov strana TOP



Príloha H - Osadzovací plán panelu PLL a oscilátorov strana BOTTOM



Príloha I - Prázdný protokol merania

Príloha J - Návrhové podklady krabičky